Gilles Léothaud

Acoustique musicale

II Psychoacoustique

Cours de DEUG 1re année

DMU2D1B

Année universitaire 2004-2005

SOMMAIRE

SOMMAIRE **68**

INTRODUCTION **73**

CHAPITRE VII **74**

ANATOMIE DU SYSTÈME AUDITIF **74**

1. Introduction 74
   1.1. Données historiques 74
   1.2. Présentation 74
2. L'oreille externe 75
   2.1. Le pavillon 75
   2.2. Le conduit auditif 75
3. L'oreille moyenne 75
   3.1. Le tympan 76
   3.2. Les osselets 76
   3.3. Les muscles et les ligaments 76
   3.4. La trompe d'Eustache 76
4. L'oreille interne 76
   4.1. Le vestibule 77
      4.1.1. Les canaux semi-circulaires 77
      4.1.2. L'utricule et le saccule 77
      4.1.3. L'innervation 77
   4.2. Le limaçon 77
      4.2.1. La cochlée 78
      4.2.2. L'organe de Corti 78
      4.2.3. L'innervation 79

CHAPITRE VIII **80**

PHYSIOLOGIE DU SYSTÈME AUDITIF **80**

1. L'oreille externe 80
   1.1. Dispositifs de sécurité 80
   1.2. Fonctionnement 80
2. L'oreille moyenne 80
   2.1. Mécanismes de protection et de régulation 80
   2.2. Fonctionnement 81
   2.3. Aspects phylogénétiques 81
3. L'oreille interne 81
   3.1. Fonction des capteurs vestibulaires 81
   3.2. La déformation de cochlée 82
   3.3. La loi du « tout ou rien » 82
4. Théorie de l'audition 82
   4.1. Survol historique 83
   4.2. La mécanique cochléaire 83
   4.3. Codage de la hauteur 85
   4.4. Codage de l'intensité 85

CHAPITRE IX **87**

L'ORIENTATION AUDITIVE **87**

1. Survol historique 87
2. L'audition binaurale 87
   2.1. La localisation circulaire 88
      2.1.1. Rôle de la phase 88
      2.1.2. Rôle de l'intensité 88
      2.1.3. Rôle du décalage temporel : l'effet Haas 88
   2.2. La localisation verticale 89
   2.3. L'évaluation de la distance 89

3. L'écoute sélective 89
4. Conclusion 90

CHAPITRE X 91

INTRODUCTION A LA PSYCHOACOUSTIQUE 91
1. Introduction 91
1.1. Principes de la psychoacoustique 91
1.2. Domaine de la psychoacoustique 91
2. Les logarithmes 92
2.1. Définition 92
2.2. L'expression logarithmique 93
2.3. Propriétés opératoires 94
2.4. Le Bel et le décibel 94
2.5. Niveau de référence : la valeur 0 dB 95
2.6. Applications numériques 95
2.7. L'addition des niveaux en décibels 96

CHAPITRE XI 98

LA SENSATION DE NIVEAU 98
1. Mesure de la sensation de niveau 98
1.1. Loi des seuils de Weber 98
1.2. Loi de Fechner 98
1.3. Application 98
2. Le champ auditif humain 99
2.1. Le diagramme de Wegel 99
2.1.1. Limites et courbes des seuils 99
2.1.2. La zone sensible de l'oreille 100
2.2. Le diagramme de Fletcher 100
2.2.1. Les courbes isosoniques 100
2.2.2. Mesure de la sonie : le phone 101
2.2.3. La non-linéarité de l'audition 101
2.2.4. Dynamique et nuances musicales 101
3. Facteurs modifiant la perception de l'intensité 102
3.1. La prévisibilité des événements sonores 102
3.2. Altérations de l'audition 102

CHAPITRE XII 104

LA SURDITÉ 104
1. L'audiogramme tonal 104
1.1. Présentation 104
1.2. Le niveau de référence 105
2. Les différents types de surdité 105
2.1. Les surdités temporaires 105
2.1.1. La fatigue auditive 105
2.1.2. Mesure de la fatigue auditive 105
2.1.3. Les surdités accidentelles 105
2.2. La surdité de transmission 106
2.2.1. Les causes 106
2.2.2. L'otospongiose 106
2.2.3. Conséquences sur l'audition 106
2.2.4. Traitement de l'otospongiose 106
2.3. La surdité de perception 107
2.3.1. Les causes 107
2.3.2. Aspects audiométriques 107
2.3.3. Conséquences sur l'audition 108
2.4. La presbyacousie 108
2.5. Les surdités centrales 109
3. L'audiométrie 109
3.1. Dépistage chez les enfants 110
3.1.1. Travaux de Gellé 110
3.1.2. Indices à surveiller 110
3.1.3. Audiométrie statistique 110

3.2. Tests complémentaires 110
3.2.1. Le Rinné 111
3.2.2. Le Weber 111
3.2.3. L'audiométrie vocale 111
3.2.4. Test de Lee 111
4. Conclusion 111

CHAPITRE XIII 113

LA SENSATION DE HAUTEUR 113
1. Introduction 113
2. La mesure de la hauteur 113
2.1. Hauteur et logarithmes 113
2.2. Les unités de mesure 113
2.2.1. Le savart 114
2.2.2. Le cent 114
2.3. Application numérique 114
3. Hauteur et tonie 115
3.1. Élaboration de la sensation de hauteur 115
3.1.1. Hauteur tonale 115
3.1.2. Hauteur spectrale 116
3.1.3. Hauteur formantique 116
4. Interférence des paramètres 117
4.1. Hauteur et registre 117
4.1.1. Distorsion de la sensation d'intervalle 117
4.1.2. L'échelle des mels 118
4.2. Hauteur et intensité : le diagramme de Stevens 118
4.3. Hauteur et durée 119
4.4. Le vibrato 119
4.4.1. Données psychophysiologiques 119
4.4.2. Aspects musicaux 120
4.5. Hauteur et timbre 120

CHAPITRE XIV 121

LA SENSATION D'INTERVALLE 121
1. Intervalles mélodiques 121
1.1. Seuil de perception différentiel des intervalles 121
1.2. Altération de la perception des intervalles 121
1.2.1. L'attraction 121
1.2.2. La tolérance 121
1.2.3. L'équivoque 122
2. Intervalles harmoniques 122
2.1. Consonance et dissonance 122
2.1.1. Théorie de Helmholtz 122
2.1.2. Données actuelles 123
2.2. Les sons subjectifs 123
2.2.1. Sons soustractifs 123
2.2.2. Sons additionnels 124
3. Justesse et accordage 124
3.1. Qu'est-ce que jouer juste ? 124
3.2. Problèmes d'accordage 125
3.2.1. Instruments à cordes 125
3.2.2. Le cas du piano 125
3.2.3. Instruments à vent 125

CHAPITRE XV 127

LE TEMPÉRAMENT DES ÉCHELLES MUSICALES 127
1. Introduction 127
2. Le tempérament pythagoricien 127
2.1. Construction 127
2.1.1. Le cycle des quintes 127
2.1.2. Le comma pythagoricien 127
2.2. Calcul des intervalles 128

2.3. Adaptation au clavier....129
2.4. Valeur musicale....130
2.4.1. Caractère mélodique....130
2.4.2. Le problème de la tierce harmonique....130
3. Les tempéraments à intonations pures....130
3.1. Le tempérament zarlinien....131
3.1.1. Construction....131
3.1.2. Valeur musicale....132
3.2. Application au clavier....132
4. Les tempéraments mésotoniques....132
4.1. Principes de base....132
4.2. Le tempérament mésotonique classique....133
4.3. Les tempéraments mésotoniques à tierces majeures altérées....134
5. Les tempéraments de transition....134
5.1. Principes et caractéristiques....134
5.2. Exemples de réalisation....134
5.3. Valeur musicale des tempéraments inégaux....136
6. Le tempérament égal....136
6.1. Perspective historique....136
6.2. Le tempérament à 12 demi-tons égaux....137
6.2.1. Valeur musicale....138
6.2.2. Le *Wohltemperierte Klavier* de J.-S. Bach....138
6.3. Le tempérament de Holder....140
7. L'ethos des tonalités....140
7.1. Différentes appréciations....140
7.2. Ethos des tonalités et tempérament égal....141

CHAPITRE XVI....143

LE DIAPASON....143
1. La mesure du diapason....143
2. Éléments d'histoire du diapason....144
2.1. Période ancienne....144
2.2. Période moderne....145
3. La codification du diapason....146
3.1. La commission Lissajous....146
3.2. La Conférence internationale de Vienne....148
3.3. Le diapason actuel....148
4. Conclusion....149

CHAPITRE XVII....150

LA SENSATION DE TIMBRE....150
1. La composition spectrale....150
1.1. Spectres harmoniques....150
1.2. Spectres à partiels....152
1.3. Spectres aléatoires....152
2. Les transitoires....152
2.1. Les transitoires d'attaque....153
2.1.1. Composante de bruit....153
2.1.2. Composante temporelle....154
2.1.3. Composante d'amplitude....154
2.2. Les transitoires d'extinction....155
3. Les composantes spatiales....155

CHAPITRE XVIII....157

LE BRUIT....157
1. Le concept de bruit....157
1.1. Bruit et environnement....157
1.2. Définitions physiques....158
1.3. Aspect psychologique du bruit....158
1.4. Bruit et musique....158
2. La mesure du bruit....159
2.1. Les unités de mesure....159

2.2. Le sonomètre 159
2.3. Le « thermomètre » du bruit 159
2.4. Limites de la métrologie 160
3. La forme du bruit 160
3.1. Structure des bruits de fond 160
3.2. Niveau physique et émergence 161
3.2.1. Bruits de faible niveau 162
3.2.2. Bruit et quantité d'information 162
3.2.3. Signaux d'avertissement 163
4. Effets du bruit sur l'homme 163
4.1. Troubles de l'écoute 163
4.2. Traumatismes auditifs 163
4.3. Effets physiologiques généraux 163
4.4. Protections individuelles contre le bruit 164

CONCLUSION 166

BIBLIOGRAPHIE 168

TABLE DES FIGURES 171

INTRODUCTION

Le présent document, *Psychoacoustique*, est le deuxième volet de mon *Cours d'Acoustique musical*e ; il fait suite au premier, intitulé *Le Son musical*, et qui comprend les deux premières parties du *Cours*. La pagination de *Psychoacoustique* continue donc et fait suite à celle du *Son musical*.

Cette **troisième partie** étudie le comportement et les performances du système auditif en fonction de l'intensité, de la hauteur et du timbre des sons : c'est le domaine de la psychoacoustique. Sont également abordées les principales questions liées à ces trois paramètres, à savoir la surdité et les déficiences auditives, les tempéraments musicaux, la constitution des échelles et les systèmes acoustiques, l'évolution du diapason, l'accord des instruments, ainsi que la problématique du bruit.

La **Bibliographie** est donnée à titre indicatif, le cours se suffisant à lui-même pour l'essentiel. Elle s'adresse aux étudiants désireux d'approfondir tel ou tel point particulier. Certains des ouvrages cités, de par leur rareté ou leur difficulté d'accès, ne sont consultables qu'en bibliothèque.

Un **Sommaire** analytique se trouve au début du cours. Je vous conseille de vous y référer souvent, chaque chapitre et même chaque paragraphe devant toujours être situé par rapport à l'ensemble. Cette recommandation est importante pour bien saisir l'organisation et l'articulation de l'exposé, ainsi que l'interdépendance de ses différentes sections ; cette consultation est d'ailleurs facilitée grâce à l'utilisation de la numérotation arborescente.

CHAPITRE VII

ANATOMIE DU SYSTEME AUDITIF

1. Introduction

1.1. Données historiques

Schématiquement, il est possible de distinguer quatre grandes étapes dans la connaissance du système auditif humain.

La première époque, de beaucoup la plus longue, mais la moins fructueuse, est celle de l'Antiquité et du Moyen Âge, qui produisit surtout des spéculations à partir d'hypothèses méta-physiques ou d'observations encore fragmentaires.

Avec la Renaissance, les connaissances en anatomie se développèrent considérablement grâce aux dissections de cadavres, et ce malgré les interdictions de l'Église. Quelques jalons donneront une idée des nombreux travaux entrepris à l'époque. Le Flamand André Vésale (1514-1564), fondateur de l'anatomie moderne, est le premier à s'attaquer aux thèses encore toutes-puissantes de l'Antiquité. Il publie en 1543 un grand traité, *De corporis humani fabrica*, dans lequel il étudie l'oreille moyenne (Livre VII), y trouvant deux osselets (en réalité, il y en a trois). Son élève en Italie, Gabriel Fallope (1523-1562), est l'auteur de nombreuses découvertes consignées dans son célèbre ouvrage *Observationes anatomica* paru en 1561. Il y décrit la cochlée dans l'oreille interne, et attribue un rôle important à l'air dans les phénomènes auditifs. Au même moment, en 1563, Bartolomeo Eustachi (1500-1574) découvre un canal reliant l'oreille moyenne au pharynx, auquel il donne son nom (la trompe d'Eustache).

Jusqu'au XIX^{e} siècle, les observations s'accumulent, dessinant une image de plus en plus précise du système auditif. Grâce au microscope, Alfonso Corti donne une description détaillée de la structure cellulaire des organes sensoriels de l'oreille interne (1851) ; cette époque est aussi celle des premières théories cohérentes de l'audition (Helmholtz, théorie de la résonance, 1857).

Où en est-on à l'heure actuelle ? Sur le plan anatomique, tout est connu, ou presque, jusqu'au niveau moléculaire. Pour la physiologie, c'est loin d'être le cas, mais grâce à des technologies de pointe (laser, ordinateur, scanner, modélisation, microchirurgie, etc.), les spécialistes proposent des hypothèses de fonctionnement de plus en plus vraisemblables et admises par le plus grand nombre. Il reste enfin que l'oreille est connectée au cerveau, et qu'en ce domaine également, malgré les énormes progrès de la neurobiologie sensorielle, tout est loin d'être élucidé.

1.2. Présentation

L'organe de l'ouïe est d'une extraordinaire complexité, comprenant des millions d'éléments logés dans des cavités de quelques centimètres, creusées dans l'os le plus dur du corps humain, le *rocher*. Il est traditionnellement divisé en trois parties (fig. 48) : l'oreille externe, seul élément visible de l'extérieur, qui capte les ondes sonores, l'oreille moyenne, qui les transforme en oscillations mécaniques, et l'oreille interne qui les code en un langage accessible au cerveau.

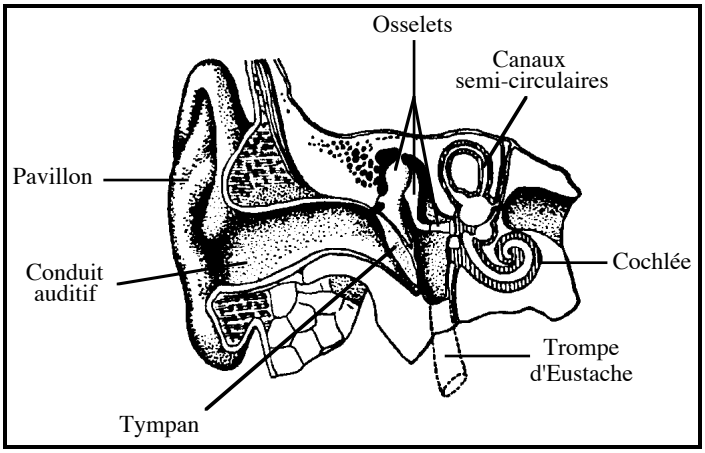


Fig. 48 : le système auditif

Par souci de clarté, l'étude du système auditif sera partagée en deux sections: l'anatomie d'abord, qui décrit les organes essentiels ; la physiologie ensuite, qui en explique le fonctionnement, et essaie de l'intégrer et de le systématiser en une théorie de l'audition.

2. L'oreille externe

2.1. Le pavillon

Le pavillon est une lame cartilagineuse en forme d'entonnoir évasé, constituée de plis et d'anfractuosités revêtant un caractère individuel, tout comme les empreintes digitales. La *conque*, partie centrale entourée par l'*hélix*, s'ouvre sur le conduit auditif.

2.2. Le conduit auditif

Long de 2,5 cm environ et 0,7 cm de diamètre, le conduit auditif externe, de forme légèrement coudée, est obturé vers l'intérieur par le tympan. Il est tapissé d'une fine pilosité et contient des glandes qui sécrètent le *cérumen*, cire visqueuse de couleur brunâtre.

3. L'oreille moyenne

L'oreille moyenne, ou caisse du tympan, est une cavité d'environ 2 cm^3, remplie d'air comme l'oreille externe. Elle comprend différents éléments : le tympan, des muscles, des ligaments et la trompe d'Eustache. Elle communique avec l'oreille interne par deux orifices obturés par une membrane, la fenêtre ovale et la fenêtre ronde (fig. 49).

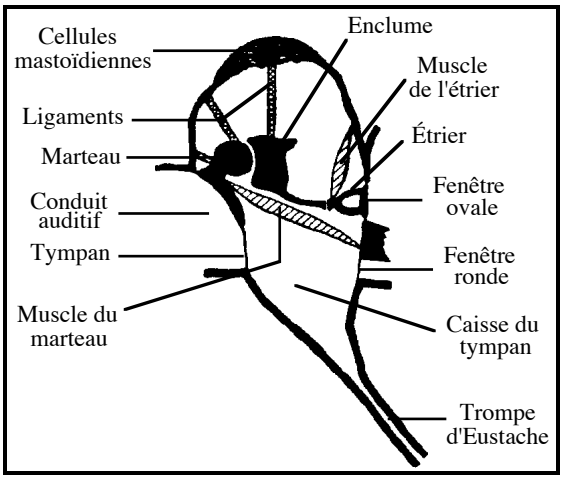


Fig. 49 : l'oreille moyenne

3.1. Le tympan

Le tympan est une membrane concave vers l'extérieur, de 1 cm de diamètre et de 1/10^{e} de mm d'épaisseur. Élastique et très résistant, il est constitué de fibres radiaires et circulaires, le tout recouvert d'épiderme.

3.2. Les osselets

Les osselets forment une chaîne comprenant le *marteau*, dont le manche est inséré dans la membrane tympanique ; l'*enclume*, sur laquelle s'appuie la tête du marteau, et qui se prolonge par une branche, l'apophyse lenticulaire, articulée à la tête de l'*étrier* ; celui-ci, le plus petit os du squelette, coulisse dans la fenêtre ovale par son autre extrémité, la platine, en contact avec l'oreille interne.

Les trois osselets sont articulés entre eux ; toutefois la liaison marteau-enclume se soude peu après la naissance.

3.3. Les muscles et les ligaments

La chaîne des osselets est tenue en suspension élastique par des *ligaments* qui relient le marteau et l'enclume à la paroi de l'oreille moyenne. L'étrier est maintenu dans la fenêtre ovale par un ligament annulaire.

Deux muscles de type long et strié, appelés *muscles tympaniques*, sont rattachés l'un au col du marteau (muscle tenseur du tympan) et l'autre à la tête de l'étrier (muscle de l'étrier).

3.4. La trompe d'Eustache

La communication de la caisse du tympan avec l'extérieur est assurée par la trompe d'Eustache, conduit ostéo-cartilagineux qui débouche dans le naso-pharynx ou arrière-gorge. Fermée en régime normal, elle s'ouvre à chaque déglutition (qui se produit inconsciemment environ une fois par minute, beaucoup plus au cours de l'alimentation), également lors du mouchage ou de forts bâillements.

4. L'oreille interne

L'oreille interne possède une structure si complexe qu'elle a mérité le nom de labyrinthe. La figure 50 montre un schéma simplifié de l'oreille interne. Le *labyrinthe osseux* (en blanc) est un ensemble de cavités creusées dans le rocher (en pointillé), comprenant deux parties : le *vestibule* à gauche et le *limaçon* à droite. Il est rempli d'un liquide, la *périlymphe*.

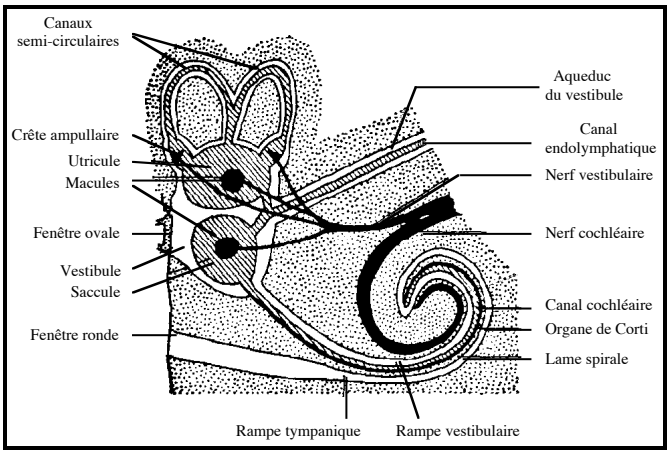


Fig. 50 : l'oreille interne

En suspension dans ce liquide et épousant les contours du labyrinthe osseux, le *labyrinthe membraneux* (en hachuré) est constitué de petits sacs communiquant les uns avec les autres, et qui contiennent eux aussi un liquide appelé *endolymphe*.

4.1. Le vestibule

4.1.1. Les canaux semi-circulaires

Ils sont au nombre de trois (la figure 50 n'en montre que deux), en forme de tubes recourbés en demi-cercles, et disposés selon trois plans perpendiculaires les uns aux autres. Chacune de leur base présente un renflement, la *crête ampullaire* où siègent des capteurs sensoriels.

4.1.2. L'utricule et le saccule

Les canaux semi-circulaires débouchent dans l'utricule. De taille légèrement plus grande que le saccule, l'utricule communique avec celui-ci par un canal de réunion sur lequel se connecte un étroit cul-de-sac, le *canal endolymphatique*. L'utricule et le saccule contiennent chacun un organe sensoriel appelé *macule*, ainsi que de fines concrétions calcaires, les *otolithes*.

4.1.3. L'innervation

Les crêtes ampullaires des canaux semi-circulaires et les macules de l'utricule et du saccule contiennent des cellules nerveuses, des neurones, qui captent les informations ; leurs axones se réunissent pour former le *nerf vestibulaire*, qui, se joignant au *nerf cochléaire*, constitue le VIII^{e} nerf crânien, *ou nerf auditif.*

4.2. Le limaçon

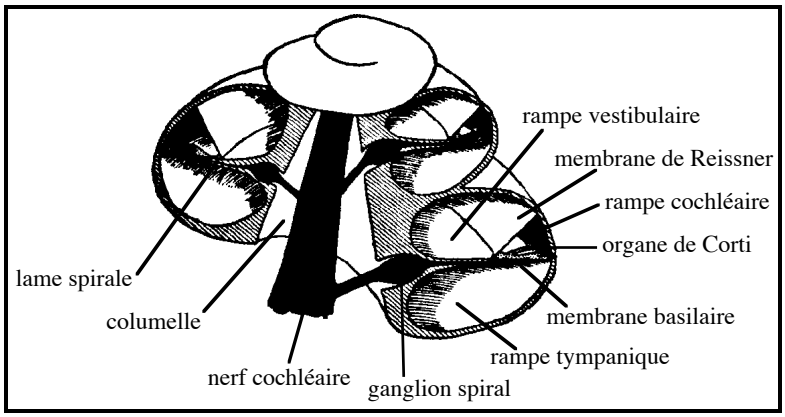


Fig. 51 : le limaçon

Le limaçon osseux est un canal creusé dans le rocher, rétrécissant vers son extrémité opposée à la fenêtre ovale. Il est enroulé 2 fois 3/4 sur lui-même, comme une coquille d'escargot (d'où son nom), autour d'un axe creux et conique, la *columelle*.

Le limaçon contient de la périlymphe dans laquelle baigne, sur toute sa longueur, la cochlée ou limaçon membraneux. Celle-ci divise le limaçon osseux en trois canaux ou rampes, comme le montre la coupe transversale de la figure 51 : la cochlée elle-même, au milieu, forme le *canal cochléaire* ; au-dessus, la *rampe vestibulaire* prend naissance, comme son nom l'indique, dans le vestibule au niveau de la fenêtre ovale ; au-dessous, la *rampe tympanique* aboutit à la fenêtre ronde. Ces deux rampes communiquent à l'extrémité du limaçon par un petit orifice, l'*hélicotrème*.

4.2.1. La cochlée

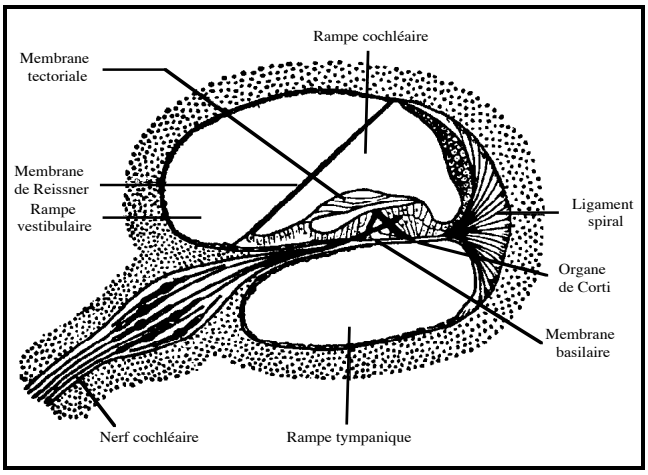


Fig. 52 : la cochlée

La cochlée, de section triangulaire, est constituée à sa base par la *membrane basilaire*. Celle-ci est attachée d'un côté au *ligament spiral*, qui tapisse la paroi externe du limaçon, et de l'autre côté à un prolongement osseux venant de la columelle, la *lame spirale* (fig. 52).

La paroi supérieure, formant un angle aigu avec la membrane basilaire, est la *membrane de Reissner*, séparant le canal cochléaire de la rampe vestibulaire.

Le troisième côté de la cochlée est la paroi osseuse interne, appelée parfois *lame des contours*. La cochlée, emplie d'endolymphe, comme tous les sacs membraneux du labyrinthe, contient l'*organe de Corti*.

4.2.2. L'organe de Corti

La membrane basilaire, relativement épaisse, est longue d'environ 32 mm, et de largeur croissante vers le sommet du limaçon : 0,04 mm à la base, pour 0,5 mm à l'apex. Sa rigidité varie également, dans des proportions considérables, d'un facteur de 1 à 200 de l'apex vers la base. L'organe de Corti est disposé sur toute sa longueur.

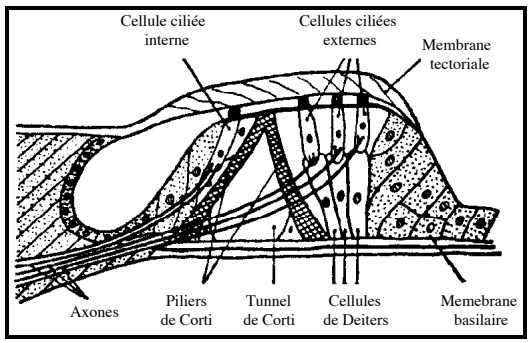


Fig. 53 : l'organe de Corti

La figure 53 est un grossissement du centre de la figure 52. L'organe de Corti comprend différents éléments :

a) les *piliers de Corti*, au nombre de 10 000 environ, se joignent à leur sommet, pour former les 5000 arcades du *tunnel de Corti* ;

b) les *cellules de soutien*, dites de Deiters, supportent les cellules sensorielles ;

c) les *cellules de Corti*, reposant sur leurs supports, ne sont donc pas en contact direct avec la membrane basilaire. Elles sont de deux sortes, réparties de part et d'autre du tunnel de Corti : les *cellules ciliées externes* (CCE) et les *cellules ciliées internes* (CCI). Les CCE sont environ 12 000,

alignées sur trois rangs dans le premier tour du limaçon (tour basal), sur quatre dans le deuxième tour, et sur cinq dans les 3/4 de tour restants (tour apical) ; cette disposition paraît logique, puisque la membrane basilaire s'élargit vers l'apex. Les CCI ne sont que 3 500, disposées sur une seule rangée ;

d) la *membrane tectoriale* recouvre l'organe de Corti, et est solidaire des cellules sensorielles dont les cils la pénètrent.

4.2.3. L'innervation

Toutes les cellules de Corti sont en contact avec des fibres nerveuses provenant du *ganglion spiral*. Celui-ci est constitué d'environ 25 000 cellules nerveuses, ou neurones, dont les axones passent par la columelle et se réunissent pour former le *nerf cochléaire*.

Le nerf cochléaire devient le *nerf auditif* après jonction avec le nerf vestibulaire. Il se dirige vers le *système nerveux central* en un trajet compliqué et indirect, passant par différents relais, notamment le bulbe rachidien et le thalamus.

Le nerf auditif parvient enfin à la partie la plus périphérique du cerveau, la plus récente dans l'évolution des êtres vivants, le *cortex cérébral*, siège de l'intelligence et de la pensée personnelle. Ses terminaisons se distribuent le long de l'aire de projection auditive, située dans la première circonvolution temporale. À ce stade, s'établissent d'innombrables connexions qui mettent en relation entre elles toutes les aires de projection des autres organes sensoriels, rendant ainsi possibles les associations entre les différentes stimulations.

En plus de ces voies nerveuses, appelées *afférentes* car allant de la périphérie au cerveau, il existe un autre faisceau, dit *efférent*, qui part du cerveau pour le système auditif, assurant ainsi la présence de celui-ci au cœur même de l'oreille interne.

CHAPITRE VIII

PHYSIOLOGIE DU SYSTEME AUDITIF

Après avoir examiné la structure de l'oreille et les principaux éléments dont elle se compose, étudions maintenant son fonctionnement, en suivant le trajet d'une onde sonore et ses transformations au sein du système auditif.

1. L'oreille externe

1.1. Dispositifs de sécurité

Indépendamment des éléments dont la fonction est purement auditive, l'oreille possède certains dispositifs destinés à la protéger, ou à en contrôler le fonctionnement.

Dans l'oreille externe, la forme coudée du conduit auditif empêche (ou limite) — particulièrement chez les enfants — la pénétration d'objets droits et rigides, susceptibles de crever accidentellement le tympan.

De même, la pilosité tapissant le conduit peut retenir grains de poussière ou parasites extérieurs, et protéger ainsi la membrane tympanique.

Le cérumen a pour fonction de « lubrifier » le tympan et d'entretenir son élasticité.

1.2. Fonctionnement

L'oreille externe, et particulièrement le pavillon, joue un rôle important dans la détection et la localisation des sources sonores (cf. chap. IX). Cela est évident chez certaines espèces animales qui peuvent orienter facilement leurs pavillons. Chez l'homme, les muscles permettant cette orientation sont rudimentaires et atrophiés.

Certains auteurs reconnaissent au pavillon, en plus de son effet focalisateur, une fonction d'adaptateur d'impédance entre le milieu extérieur et le conduit auditif : en amortissant l'onde qui pénètre dans l'oreille, le pavillon l'adapterait à ses nouvelles conditions de propagation et, permettant un meilleur transfert d'énergie, jouerait en quelque sorte le rôle d'une antenne en électronique[1].

Quant au conduit auditif, dont le rôle est de guider les ondes jusqu'au tympan, il possède une fréquence propre aux environs de 3 500 Hz, ce qui entraîne une élévation de la sensibilité auditive autour de cette valeur, par effet de résonance.

2. L'oreille moyenne

2.1. Mécanismes de protection et de régulation

Le tympan est recouvert d'épiderme, ce qui lui permet de repousser et de cicatriser après une déchirure ou un percement volontaire (paracentèse en cas d'otite, pour évacuer le pus accumulé dans l'oreille moyenne). Son innervation dense lui confère une grande sensibilité, et la douleur, en cas d'agression, joue le rôle d'un signal d'avertissement.

---

[1] Cf. notamment J.V. Tobias éd., *Foundations of Modern Auditory Theory*, 2 vol., New York, 1970.

Le tympan est très peu sélectif, grâce à ses fibres à la fois radiaires et circulaires qui ne privilégient pas de fréquences particulières : il est donc apte à capter sans distorsion un large éventail spectral de 16 à 20 000 Hz (dans le meilleur des cas), comme peu de microphones n'y parviennent actuellement.

Les muscles tympaniques, par leur contraction, raidissent la chaîne des osselets et diminuent l'amplitude réellement transmise à l'oreille interne : le système nerveux central peut donc intervenir directement dans le processus de transmission de l'onde sonore, et adapter en permanence le niveau reçu. Une expression comme « tendre l'oreille » (mais qui consiste à *décontracter* les muscles) rend bien compte d'une action qui peut devenir en partie volontaire.

Pour qu'elle puisse vibrer normalement, la même pression aérienne doit s'appliquer de part et d'autre d'une membrane. Or, aussi bien la pression atmosphérique que celle qui règne dans l'oreille moyenne (et qui doit être identique) sont susceptibles de variations. Comme la trompe d'Eustache communique avec l'extérieur, elle rétablit, chaque fois qu'elle s'ouvre, l'égalité entre les deux faces du tympan.

2.2. Fonctionnement

Les ondes sonores captées par l'oreille externe sont transmises à l'oreille interne par la chaîne des osselets. Les vibrations de l'air sont ainsi transformées en oscillations mécaniques de même fréquence, mais d'amplitude variable par l'action des muscles tympaniques.

Cette transformation du signal est rendue nécessaire par le fait que le milieu aérien d'où vient l'onde et le milieu liquide du labyrinthe sont d'impédances très différentes. Le rôle des osselets est d'assurer la meilleure transmission possible en changeant la nature du mouvement vibratoire.

Mais de plus, la chaîne ossiculaire amplifie le signal, et ceci par deux procédés différents. D'abord, les osselets sont articulés en bras de levier, réduisant la course de l'étrier par rapport à celle du marteau et multipliant ainsi la force par 3 (il n'y a pas de rapport entre cette valeur et le nombre d'osselets) ; ensuite, la surface de la fenêtre ovale étant vingt fois plus petite que celle du tympan, la force est multipliée par 20. L'amplification totale est donc égale à : $3 \times 20 = 60$ fois.

L'oreille moyenne modifie également la forme du signal. En effet, les ligaments qui maintiennent les osselets ne sont disposés que d'un seul côté de la chaîne (cf. fig. 49) ; lorsque celle-ci est excitée, leur force de rappel élastique modifie la forme du mouvement, favorise l'asymétrie des demi-périodes, ce qui a pour effet la complexification de la forme de l'onde et aboutit à la création d'harmoniques.

2.3. Aspects phylogénétiques

L'oreille interne, dont les organes sensoriels sont remplis de liquide, était parfaitement bien adaptée à la vie sous-marine. Elle est une des traces de l'évolution de notre espèce, issue de poissons qui, au cours de millions d'années, abandonnèrent progressivement le milieu aquatique pour devenir amphibiens.

Une adaptation à l'audition aérienne devint nécessaire, et c'est précisément l'oreille moyenne qui remplit cette fonction. Les poissons actuels ont des mâchoires formées de plusieurs os ; chez les reptiles, apparus plus tard, certains de ces os se sont déplacés pour constituer l'oreille moyenne et chez les mammifères, situés encore plus haut dans l'échelle évolutive, la mâchoire n'est constituée que d'une seule pièce, mais l'oreille moyenne comporte trois osselets.

3. L'oreille interne

3.1. Fonction des capteurs vestibulaires

Les organes du vestibule renseignent le système nerveux central (SNC) sur notre position dans l'espace et lui permettent de gérer notre équilibre. Ils remplissent des fonctions différentes et complémentaires.

Les crêtes ampullaires des canaux semi-circulaires sont des organes *rotatorécepteurs*, c'est-à-dire sensibles aux accélérations angulaires : lors des mouvements rotatifs de la tête, l'endolymphe est entraînée et déplace les cellules sensorielles des crêtes ampullaires ; ainsi stimulées, les cellules délivrent des influx en direction du SNC. De par la disposition des canaux semi-circulaires, le déplacement est analysé en trois dimensions.

Les macules de l'utricule et du saccule sont des organes *statorécepteurs* ; ils ne sont pas sensibles aux mouvements mais à la position de la tête. Les otolithes, soumis à la pesanteur, reposent en des points différents selon la position de la tête, provoquant ainsi l'excitation des cellules correspondantes ; celles-ci avertissent de ce contact les centres nerveux qui règlent la posture et gèrent l'équilibre du corps par l'intermédiaire des muscles concernés. L'utricule est spécialisé dans la détection des positions horizontales, le saccule plutôt dans celle des positions verticales.

> L'appareil auditif est le premier organe sensoriel à se mettre en place au cours du développement embryonnaire du fœtus, et au sein de celui-ci, le vestibule apparaît en premier. C'est la reproduction de ce qui se produit au niveau phylogénétique, et chez les poissons les plus archaïques, comme l'*ostracoderme* de l'époque dévonienne (300 millions d'années), on trouve déjà des traces de canaux semi-circulaires.
> Il est facile de mettre en évidence l'importance des capteurs vestibulaires, par exemple en tournant rapidement sur soi-même puis en s'arrêtant brusquement : la sensation de « tournis » alors éprouvée est due à l'inertie de l'endolymphe, et les informations communiquées au SNC, quoique ne correspondant plus à la réalité, risquent d'être tout de même prises en compte, ce qui peut provoquer un déséquilibre du corps.
> C'est l'un cas où les données du vestibule priment sur la conscience de la situation (le cerveau sait que le corps est immobile) et même sur celles de la vision, qui participe également à l'équilibration : on « voit » tourner la pièce autour de soi, le décalage des sensations pouvant provoquer un vertige.

3.2. La déformation de cochlée

Une onde aérienne est transformée en oscillations mécaniques par l'oreille moyenne. L'étrier transmet ces oscillations au limaçon par la fenêtre ovale. Le mouvement pénètre dans la rampe vestibulaire, les compressions de la périlymphe repoussent le canal cochléaire dans la rampe tympanique, dont la périlymphe à son tour fait incurver sous sa pression la fenêtre ronde vers l'oreille moyenne. Aux basses fréquences, une partie de l'énergie passe d'une rampe à l'autre par l'hélicotrème.

Dans l'oreille interne, l'onde se présente donc sous forme de variations de pression du liquide périlymphatique produisant des déformations de la cloison cochléaire ; les mouvements des cellules ciliées sont provoqués par les déplacements de la membrane basilaire et de la membrane tectoriale baignée d'endolymphe. Les deux membranes ne sont pas animées du même mouvement, d'où un « cisaillement » des cellules de Corti qui provoque leur excitation.

3.3. La loi du « tout ou rien »

Lorsque les cellules de Corti sont stimulées, elles délivrent des influx nerveux dont la valeur ne dépend pas de la grandeur de la stimulation. C'est le principe du « tout ou rien » : au-dessous d'un certain seuil, la cellule ne répond pas ; à partir d'un certain seuil elle répond, et toujours de la même façon, quelle que soit la grandeur de la stimulation ; enfin, si la stimulation est trop grande, la cellule peut être endommagée ou même détruite.

4. Théorie de l'audition

La simple description des mouvements physiques produits dans la cochlée ne peut rendre compte à elle seule du fonctionnement de l'audition. Les faits observés doivent être expliqués et justifiés de façon cohérente. C'est précisément le rôle de la théorie de l'audition.

4.1. Survol historique

Pythagore avait déjà reconnu la nature vibratoire du son. Les savants qui lui succédèrent comprirent que ces vibrations se propagent dans l'air, frappent le tympan, et pénètrent dans l'oreille. Hippocrate, au IVe s. av. J.-C., pensait que les os de la tête communiquaient directement le son au cerveau, mais Galien (≈ 175 apr. J. -C.) comprit que ce sont les nerfs qui véhiculent la sensation.

Tous les savants admettaient alors que le siège de l'audition était une poche d'« air implanté » à l'intérieur de l'oreille, hermétiquement close, et qui reproduisait fidèlement les vibrations sonores venant de l'extérieur.

Lorsque l'anatomie de l'oreille moyenne fut mieux connue, notamment grâce aux travaux de Vésale, Ingrassia et surtout d'Eustachi à la Renaissance (cf. chap. précédent), on se rendit compte qu'aucune poche d'air étanche ne pouvait s'y trouver ; celle-ci fut donc située dans l'oreille interne, où ses vibrations devaient exciter les terminaisons du nerf auditif.

C'est seulement deux siècles plus tard, en 1760, que Domenico Cotugno affirma que le liquide contenu dans la cochlée la remplissait complètement et ne laissait aucune place pour de l'air. C'est ce que confirma l'Allemand Philipp Meckel en 1777, qui observa une oreille interne après l'avoir fait geler toute une nuit d'hiver…

Au XVIIe s. apparaissent les premiers travaux sur la sensation musicale, et particulièrement sur la perception de la hauteur. En 1605, Gaspard Bauhin, de l'Université de Bâle, suggère que les cavités du limaçon entrent en résonance sous l'effet de l'onde sonore, leurs différents volumes répondant à des fréquences différentes, les graves reçus dans les cavités les plus grandes, les aigus dans les plus petites.

En 1683, dans son *Traité de l'Organe de l'Ouïe*, Joseph Guichard du Vernay attribue un rôle fondamental à la lame spirale. Observant qu'elle devient de plus en plus étroite, il déduit que ses parties successives réagissent à des fréquences diverses : les portions larges, vibrant plus lentement, répondent aux sons graves, les plus étroites, plus rapides, aux aigus de sorte que *« le nerf qui est réparti sur toute sa surface reçoit des impressions différentes qui représentent dans le cerveau des caractéristiques sonores diverses »*[1].

Il fallut attendre la découverte par Corti, en 1851, de la structure cellulaire de la cochlée pour que l'hypothèse de Guichard du Vernay fût abandonnée. Peu après, Helmholtz put formuler sa célèbre théorie, qui conservait le principe de la résonance sélective de Bauhin et du Vernay, mais situait le phénomène dans l'organe de Corti : les fibres transversales qui constituent la membrane basilaire sont de plus en plus tendues puisque celle-ci s'élargit vers l'apex. Elles répondent donc toutes à des fréquences différentes et peuvent ainsi analyser une onde complexe.

4.2. La mécanique cochléaire

Les recherches de Georg von Bekesy sont à l'origine des théories modernes de l'audition[2]. Il a imaginé des modèles mécaniques simulant le comportement de la cochlée en fonctionnement, mais a aussi observé des oreilles internes prélevées sur des cadavres frais, réalisant de véritables tours de force expérimentaux : pour rendre les membranes plus visibles, il déposait dessus une fine poudre d'argent ; après avoir aminci en plusieurs points la paroi osseuse jusqu'à la transparence, il imposait des mouvements vibratoires à l'étrier et pouvait observer les mouvements ainsi produits dans les différents tours de spire avec un microscope sous éclairage stroboscopique.

Il a constaté que, lorsque l'étrier oscille dans la fenêtre ovale, la membrane basilaire vibre avec un maximum d'amplitude localisé différemment selon la fréquence : situé près de l'apex pour les basses fréquences, il se déplace vers la base lorsque la fréquence augmente (fig. 54). Ce modèle simplifié de cochlée indique la position du maximum d'amplitude d'une perturbation en fonction de

[1] Cité par S. S. Stevens et F. Warshofsky, *L'acoustique*, trad. fr., Paris, 1970, p. 51.

[2] G. von Bekesy, *Experiments in Hearing*, New York, 1960.

sa fréquence : les tracés pointillés (1), en tirets (2) et en trait plein (3) montrent respectivement des hauteurs croissantes.

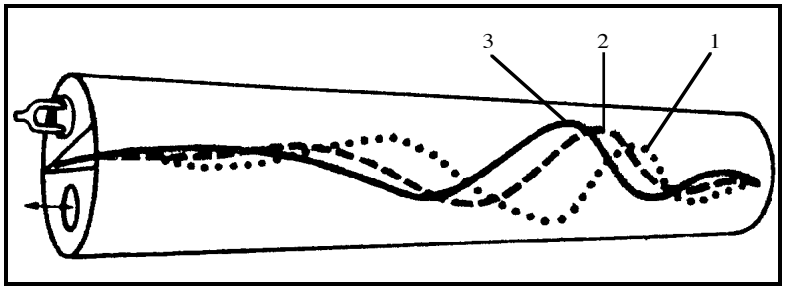


Fig. 54 : modélisation de la cochlée

Après des observations complémentaires sur des oreilles humaines, Bekesy affina ses résultats et obtint des valeurs chiffrées : à partir de 800 Hz environ, les vibrations sont de très faible amplitude à la partie apicale de la cochlée, et celle-ci reste pratiquement immobile ; plus la fréquence augmente, plus longue est la portion de membrane basilaire à rester statique à l'apex. Ces conclusions sont schématisées sur la figure 55.

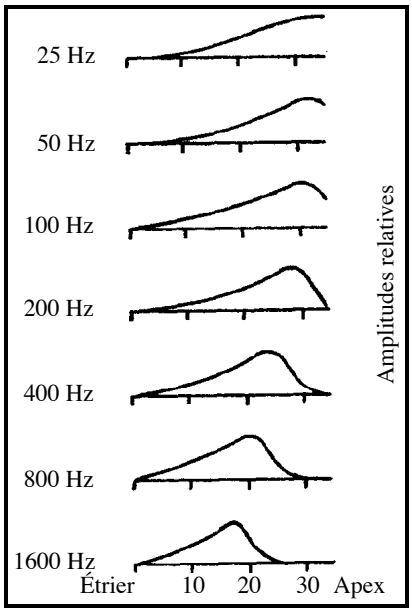


Fig. 55 : la tonotopie cochléaire

Ces courbes mesurent l'amplitude du mouvement vibratoire (en ordonnée) des différents points de la membrane basilaire, dont la distance à la base du limaçon est portée en abscisse. Elles montrent que :

•pour chaque fréquence, un point de la membrane vibre de façon plus ample que les autres ;

•ce maximum d'amplitude se rapproche d'autant plus de la base du limaçon que la fréquence est plus élevée ;

•le maximum d'amplitude est d'autant plus aplati que la fréquence est plus basse, et d'autant plus « pointu » qu'elle est plus élevée.

Comme les cellules de Corti obéissent au principe du tout ou rien, seules fonctionnent celles qui sont concernées par un maximum d'amplitude.

4.3. Codage de la hauteur

Il existe donc une tonotopie, ou « carte des hauteurs » le long de la cochlée. Mais les chercheurs ont été frappés depuis longtemps par le contraste existant entre la rusticité de cette tonotopie et l'extrême finesse de la sensibilité humaine aux hauteurs. Des résultats récents viennent éclairer d'un jour nouveau le fonctionnement de la cochlée[1].

Lorsque les CCE sont stimulées, elles se contractent et rigidifient leurs cils, ce qui amplifie le mouvement relatif de la membrane tectoriale : les CCE concernées par la stimulation « s'accordent » finement, augmentant la sensibilité et la sélectivité de la membrane basilaire à cet endroit. Les CCI correspondantes transforment le message vibratoire en influx nerveux qui seront transmis au cerveau. Dans ce schéma de fonctionnement, les CCE jouent en quelque sorte le rôle d'un « préamplificateur », préparant le travail des CCI.

D'autre part, le câblage nerveux des CCE et celui des CCI est tout à fait distinct : les CCI sont connectées au nerf auditif et font donc partie du système afférent (*vers* le système nerveux central), alors que les CCE sont principalement sous la dépendance du système efférent (*venant* du SNC). Elles reçoivent donc des ordres directement des centres nerveux, ce qui bouleverse les conceptions classiques de l'audition. Il est désormais possible de comprendre certains phénomènes demeurés jusqu'ici mystérieux, comme l'écoute sélective (cf. chap. IX).

Lorsque l'oreille est stimulée, le nerf auditif achemine les influx nerveux vers le cerveau. Comme tous les nerfs, il possède une période réfractaire, c'est-à-dire qu'après chaque influx, il doit « se reposer » et ne peut plus rien transmettre pendant un certain temps, dans le cas présent d'une durée de 1/1000^{e} de seconde. La fréquence maximum que le nerf se conduire dans ces conditions est donc de 1000 Hz, puisqu'il ne saurait y avoir plus de 1000 périodes réfractaires en une seconde. Pour transmettre des fréquences plus élevées, les fibres du nerf, c'est-à-dire les axones, ne fonctionnent pas toutes simultanément : aux environs de 1000 Hz, les axones se divisent en deux groupes, chacun répondant une fois sur deux : la fréquence reste inchangée, mais chaque fibre travaille deux fois plus lentement ; le même phénomène se reproduit vers 2000 Hz, et les axones ne travaillent plus qu'une fois sur trois.

Le nerf auditif transmet donc de façon synchrone les fréquences cochléaires jusqu'à 3000 Hz. Au-delà, c'est la localisation des cellules de Corti stimulées (tonotopie) qui renseigne le SNC sur la fréquence du son, localisation rendue possible puisque depuis 800 Hz, la membrane basilaire ne vibre plus dans toute sa longueur.

En résumé, depuis les basses fréquences jusqu'à 3000 Hz environ, le nerf fonctionne en synchronisation avec la cochlée, monophasée jusqu'à 1000 Hz, biphasée de 1000 à 2000 Hz, et triphasée de 2000 à 3000 Hz ; à partir de 800 Hz pour les hautes fréquences, intervient le système de la localisation ; de 800 à 3000 Hz, les deux procédés existent simultanément.

4.4. Codage de l'intensité

Le principe en est encore mal connu au niveau cochléaire. Une cellule de Corti, obéissant au principe du tout ou rien, c'est-à-dire donnant toujours la même valeur à l'impulsion, ne peut à elle seule rendre compte de l'intensité d'un stimulus. Mais si un son est plus intense, la perturbation mécanique est plus forte, et le nombre de cellules excitées plus grand sur la membrane basilaire. Il est probable que cette plus ou moins grande quantité de cellules stimulées pour des fréquences égales mais d'amplitudes différentes soit précisément la traduction du code de l'intensité dans la cochlée.

Les impulsions circulant le long du nerf ne possèdent elles aussi qu'une seule valeur. Mais dans un nerf, l'intensité d'une stimulation est rendue par la fréquence, ce qui complique singulièrement les choses, ce code étant déjà utilisé pour la traduction de la hauteur.

---

[1] Cf. notamment P. Bonfils, M.-C. Rémond, R. Pujol, «Efferent tracts and cochlear frequency selectivity», *Hearing Research*, 24, 1986.

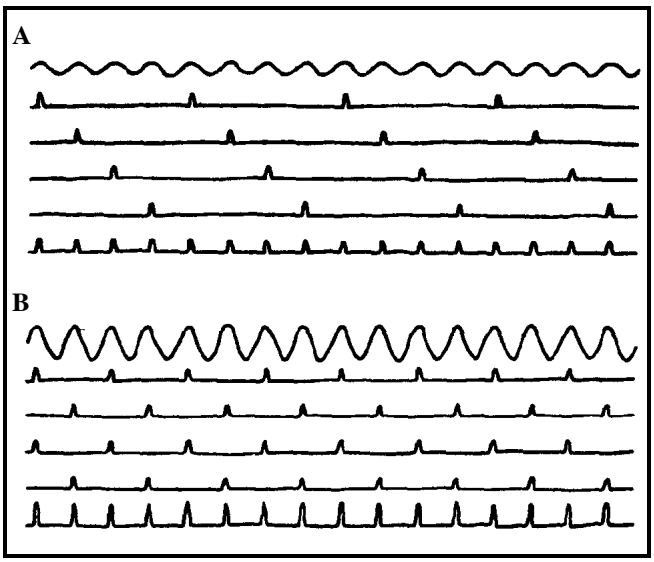


Fig. 56 : théorie de la volée

Comme l'a montré E. G. Wever dans sa célèbre *Théorie de la volée* formulée en 1949, les fibres, au sein d'un groupe, ne réagissent pas toutes simultanément, et lorsque l'intensité augmente, la fréquence de chaque fibre augmente sans toutefois modifier la réponse globale du nerf (fig. 40). Il intervient également un *recrutement* de fibres, qui sont donc de plus en plus nombreuses. Le nombre d'axones du nerf auditif (30 000) semble suffisant pour assurer cette fonction.

La figure 56 montre en A un groupe de quatre fibres qui répondent une fois sur quatre ; en B, la fréquence de leur réponse est deux fois plus élevée, mais la réponse globale du nerf reste la même, parce que les influx des différentes fibres tombent en même temps. Pour le système nerveux central, cela se traduit par une augmentation de l'intensité, et non de la fréquence.

CHAPITRE IX

L'ORIENTATION AUDITIVE

L'orientation auditive est la faculté qui nous permet de localiser une source dans l'espace environnant, et de détecter sa provenance. S'il paraît aujourd'hui évident que c'est la coopération des deux oreilles qui offre cette possibilité, ce fut loin d'être toujours le cas, et cette idée mit beaucoup de temps à s'imposer.

1. Survol historique

Le philosophe grec Zénon de Citium (≈335–≈264 av. J.-C.), fondateur du stoïcisme, enseignait que la nature a donné aux hommes une langue et deux oreilles, afin qu'ils puissent écouter deux fois plus que parler. Beaucoup plus près de nous était encore répandue l'idée que les deux oreilles n'étaient qu'un exemple de symétrie bilatérale, et qu'à l'instar des poumons ou des reins, le second organe était prêt à remplacer le premier en cas de déficience.

La fonction d'orientation auditive a été établie pour la première fois par le biologiste italien Lazzaro Spallanzani (1729-1799), à la fin du XVIII^{e} siècle : à l'issue d'une étude sur les chauves-souris, il affirma que ces animaux « voyaient » avec leurs oreilles, et étaient capables de se diriger et d'éviter les obstacles uniquement grâce à leur sens de l'ouïe.

L'opposition scientifique fut très forte, notamment celle de Georges Cuvier à l'époque[1], et au milieu du XIX^{e} siècle, le psychologue écossais Alexander Bain pouvait encore écrire que l'audition binauriculaire ne jouait strictement aucun rôle dans la localisation des sons[2].

Ce sont les travaux de Lord Rayleigh[3], à partir de 1876, qui apportèrent les premiers résultats réellement scientifiques, avec la découverte de mécanismes que nous étudierons plus loin.

Enfin, les recherches menées par Harvey Fletcher (1884-1981) aux Laboratoires Bell de New York dans les années 1930 sur la stéréophonie[4] ont fourni une importante contribution expérimentale à ce problème.

2. L'audition binaurale

Lorsqu'une source sonore est décentrée par rapport à la tête, les oreilles ne captent pas le même message, et le cerveau reçoit de ses canaux auditifs des informations non identiques : c'est précisément par le traitement de ces différences de perception qu'il parvient à localiser la source. Il va de soi que si l'origine du son se trouve à égale distance des deux oreilles, c'est l'absence même de différence perceptive qui permet de reconnaître sa position centrée.

La localisation complète d'une source sonore suppose trois opérations :

•une **localisation circulaire**, autour du sujet, c'est-à-dire sur une circonférence dont la tête est le centre ;

•une **appréciation de l'élévation**, de l'éloignement en hauteur par rapport au sol ;

---

[1] Cf. G. Cuvier, *Leçons d'anatomie comparée,* Paris, 1800-1805.

[2] A. Bain, *The Senses and the Intellect,* Londres, 1855.

[3] J. Rayleigh, op. cit., 1878.

[4] H. Fletcher, *Speech and Hearing in Communication,* New York, 1953.

•une **appréciation de la distance**, de l'éloignement dans le plan horizontal ;

Il s'agit donc d'une opération complexe qui met en jeu différentes fonctions du système auditif.

2.1. La localisation circulaire

C'est la plus précise, la plus importante, et la mieux connue. Le système nerveux central exploite, comme nous venons de le voir, des différences de perception entre les deux oreilles, intéressant trois paramètres :

•**différence d'intensité** : la tête fait écran, le son s'amortit d'une oreille à l'autre ;

•**différence de phase** : les oreilles étant spatialement décalées par rapport à la source, elles ne sont pas en phase ;

•**différence de temps** : le son met un certain temps pour aller d'une oreille à l'autre.

Ces différences de perception sont utilisées de façon complémentaire par le système auditif et varient selon la fréquence de l'onde sonore.

2.1.1. Rôle de la phase

Il concerne les basses fréquences, inférieures à 800 Hz. Si le son est grave, la longueur d'onde λ est grande ; si elle est supérieure à la distance d entre les deux oreilles, celles-ci ne pourront être en phase, et ce décalage permet au système nerveux central de localiser la source. Dans des conditions réelles, pour une précision optimale, la longueur d'onde doit être telle que :

$$\frac{\lambda}{2} > d$$

Comme $d \approx 22$ cm en moyenne, cela correspond à une fréquence d'environ 800 Hz. Si le son est aigu, λ est inférieur à la distance d, et les deux oreilles peuvent se retrouver en phase, avec toutefois un décalage de plusieurs périodes. Dans ce cas, le cerveau n'est pas en mesure de localiser la source.

2.1.2. Rôle de l'intensité

Il concerne les hautes fréquences, supérieures à 4000 Hz. C'est ici la différence d'intensité qui intervient. Aux hautes fréquences, l'amortissement de l'onde, d'une oreille à l'autre, est en effet plus important qu'aux basses fréquences. Si la source est complètement latéralisée, l'amortissement entre les deux oreilles peut atteindre :

à 300 Hz : 0 dB à 1000 Hz : 8 dB à 10 000 Hz : 30 dB

La diffraction est d'autant plus importante que la longueur d'onde est petite par rapport à la dimension de la tête.

2.1.3. Rôle du décalage temporel : l'effet Haas

Cela concerne toutes les fréquences. Un décalage temporel existe entre les deux oreilles, qui permet également la localisation, quelle que soit la fréquence de l'onde. L'expérience suivante met en évidence une importante propriété de l'oreille.

On envoie à un sujet muni d'un casque deux impulsions très brèves, deux clics, un dans chaque oreille, séparés par un intervalle de temps Δt :

→ si $\Delta t \geq 2 \cdot 10^{-3}$ s, le sujet entend deux sons, un dans chaque oreille ;

→ si $\Delta t \leq 3 \cdot 10^{-5}$ s, les deux clics fusionnent en un seul, non localisable ;

→ si $2 \cdot 10^{-3}$ s $> \Delta t > 3 \cdot 10^{-5}$ s, le sujet n'entend qu'un son unique, mais dans l'oreille où est arrivé le premier clic.

Ce phénomène fondamental est appelé *loi du premier front d'onde, effet Haas,* ou encore *effet de précédence,* selon les auteurs[1].

Dans la réalité, quand une source est complètement latéralisée, l'intervalle de temps Δt entre les deux oreilles est maximum : sa valeur est alors d'environ $7 \cdot 10^{-4}$ s, c'est-à-dire de toute façon comprise dans la fourchette de la loi du premier front d'onde. C'est pourquoi nous n'entendons jamais deux sons, même très rapprochés, quand la source est située à droite ou à gauche.

Si $\Delta t = 0$, le son est centré. Mais il ressort des valeurs indiquées ci-dessus qu'un léger décentrage, correspondant à seulement 1 cm de différence de trajet pour l'onde incidente, provoque déjà un décalage temporel de $3 \cdot 10^{-5}$ s, donc à la limite de l'effet Haas.

En d'autres termes, si la source n'est pas centrée, les deux oreilles sont pratiquement toujours dans ce cas de figure, et la localisation est possible.

La précision de la localisation est cependant inégale selon l'angle de perception. On admet généralement les valeurs suivantes :

$$\approx 1° \text{ en face} \approx 10° \text{ latéralement}$$

D'où le réflexe de regarder dans la direction du son : il s'agit moins de voir que de placer ses deux oreilles à égale distance de la source, pour une précision de localisation optimale.

2.2. La localisation verticale

Cette propriété est beaucoup moins précise que la localisation circulaire, et revêt une moindre importance, la plupart des sons étant produits par les hommes eux-mêmes, le plus souvent à leur hauteur.

Elle met probablement en jeu les canaux semi-circulaires, dont la fonction de localisation demeure encore assez mal connue. Peut-être jouent-ils aussi un rôle dans la détection en avant et en arrière de la source (faculté également médiocre, et qui en tout état de cause n'est pas élucidée par la localisation circulaire).

De toute façon, le rôle auxiliaire de la vision semble important pour apprécier l'élévation des sources sonores.

2.3. L'évaluation de la distance

Il s'agit d'une propriété différente des précédentes, et qui n'est pas directement en rapport avec la physiologie du système auditif. Elle est liée à l'expérience, et n'est donc pas innée. Elle s'apprend, et est fonction des informations déjà stockées en mémoire.

D'une façon générale, le cerveau effectue une comparaison entre les sons entendus et des sons de même nature mémorisés antérieurement : la comparaison porte non seulement sur l'intensité, mais aussi sur le timbre. En effet, entre un son proche et un son lointain, la différence ne se limite pas au niveau : le spectre sonore est modifié par la distance, notamment les composants aigus, qui sont plus absorbés que les graves.

Le système auditif ne peut donc mesurer une distance : même après avoir passé des années à observer des avions en vol, nous ne saurons jamais, si personne ne nous l'apprend, à quelle altitude ils évoluent.

3. L'écoute sélective

Connue également sous le nom d'« effet cocktail », cette faculté nous permet d'isoler une source parmi d'autres dans un ensemble, un instrument précis dans l'orchestre, une voix particulière dans un brouhaha de conversations, et de l'écouter indépendamment des autres.

Cette possibilité est à la base de l'écoute intelligente. Elle est fondamentale dans la perception de l'environnement sonore, et représente la capacité d'extraire de l'information dans un contexte où le niveau du bruit de fond est plus élevé que celui du signal utile.

---

[1] Cf. R. Condamines, *Stéréophonie. Cours de relief sonore,* Paris, 1978.

Une telle propriété est probablement liée à la perception spatiale des sons : l'écoute sélective est beaucoup plus facile dans des conditions naturelles qu'à partir d'une reproduction stéréophonique, et devient presque impossible en monophonie.

La reconnaissance des formes joue également un rôle important : d'une part, il est nettement plus facile de s'attacher à une voix connue, et le timbre aide à la discrimination ; d'autre part, la cohérence de l'information permet de suivre le discours, qu'il soit musical ou parlé. L'écoute a en effet un caractère prévisionnel, et la prévision n'est possible que si l'énoncé est compris.

Mais le cerveau n'est pas seul en cause, et de récents progrès dans la connaissance de l'organe de Corti[1] ont montré que les CCE peuvent modifier localement les propriétés sélectives de la cochlée, « l'accorder » plus ou moins selon les instructions du système nerveux central, et même la préparer, éventuellement, à entendre tel ou tel son.

4. Conclusion

La localisation binauriculaire est une opération très complexe. Les sons réels, composés à la fois de basses et de hautes fréquences, c'est-à-dire de grave et d'aigu, sont donc localisés par plusieurs procédés simultanément : le fondamental et les premiers composants par différence de phase, les harmoniques de rangs plus élevés par différence d'intensité, et le spectre dans son ensemble par différence de temps.

Les obstacles se trouvant inévitablement dans le champ de propagation de l'onde viennent encore compliquer l'opération en la perturbant. Ils obligent le système nerveux à discriminer les sons directs et leurs réflexions, à identifier la direction réelle de la source.

De plus, la localisation d'une source utile ne s'effectue jamais dans le silence complet. Le bruit de fond, plus ou moins important, est un facteur de gêne s'ajoutant au signal et pouvant brouiller sa détection. Le nombre de paramètres traités par le système nerveux central en quelques millisecondes, et la finesse des éléments comparés laissent rêveur…

La localisation binauriculaire, pratiquée en permanence par chaque individu — le plus souvent inconsciemment — permet, en coordination avec les autres activités sensorielles, de prendre conscience de notre environnement, de le structurer et de l'intégrer en une image mentale.

[1] Cf. supra, chap. VIII, § 4.3.

CHAPITRE X

INTRODUCTION A LA PSYCHOACOUSTIQUE

1. Introduction

1.1. Principes de la psychoacoustique

Si le système auditif se comportait comme un appareil de mesures physiques en laboratoire, si la perception humaine correspondait aux résultats lus sur des cadrans gradués ou exprimés par des courbes et des diagrammes, la psychoacoustique n'existerait pas.

Il apparaît en effet des divergences entre ce que l'on mesure et ce que l'on perçoit : le subjectif ne se laisse pas parfaitement décrire par l'objectif, et il est difficile, sinon impossible, de fournir une description mathématique de nos sensations, ou simplement de prévoir avec précision les réactions de notre système auditif.

L'expérimentation demeure donc une nécessité. Mais avec quoi expérimenter ? Avec quel genre de sons ?

La tentation est forte d'utiliser des artefacts, c'est-à-dire des sons artificiels, engendrés par des générateurs électroniques, bien contrôlés, aisément calibrables, faciles à (re)produire ; mais de tels sons n'ont pas de réalité musicale, et apparaissent surtout beaucoup trop simples. Des expériences se limitant à ces artefacts ne pourraient rendre compte de toute la complexité de l'audition. Il n'est cependant pas toujours possible de les éviter, et l'interprétation des résultats, dans ces situations, doit tenir compte de leur nature artificielle.

1.2. Domaine de la psychoacoustique

La psychoacoustique étudie la perception auditive sous l'angle des quatre paramètres sonores fondamentaux : la hauteur, la durée, le timbre, et l'intensité, cités ici par ordre d'apparition historique dans la notation musicale.

La **hauteur** a d'abord été notée seule, dans les systèmes littéraux (c'est-à-dire à base de lettres) ; les **durées** sont apparues avec les notations neumatiques. Ces deux paramètres sont les plus importants : au Moyen Âge, surtout à partir du XIII^{e} siècle, l'écriture atteint déjà une grande précision, et des progrès concernant le rythme (démultiplication des figures longues en valeurs de plus en plus brèves) interviennent encore au siècle suivant sous l'impulsion des théoriciens de l'Ars Nova.

La notation du **timbre** est en rapport avec l'instrumentation. Celle-ci n'est pratiquement jamais précisée avant le début du XVII^{e} siècle.

Giovanni Gabrielli apparaît comme un précurseur lorsque dans ses *Sacræ Symphoniæ* (1597), il demande une instrumentation précise et fournit des indications de nuances. À l'inverse, François Couperin publie en 1714 des *Concerts royaux l'usage de toutes sortes d'instruments de musique*, et Jean-Marie Leclair, pour son *Concerto op. 7 n° 3* (1737), offre au soliste la possibilité de la flûte, du violon ou du hautbois. On sait que Jean-Sébastien Bach lui-même ne précisait pas toujours son instrumentation ou laissait le choix de l'instrument principal.

L'**intensité** concerne les nuances et la dynamique. Aucune indication n'est fournie dans les partitions probablement avant 1517, date de parution de la *Tablature de luth* de Vincenzo Capirola

où figure la mention « *tocca pian piano* ». À la fin du XVI^e siècle, *piano* et *forte* sont notés en toutes lettres ; les premières abréviations figurent peut-être dans la *Partitura di Madrigali* de Domenico Mazzochi (1638).

Au XVIII^e siècle, la situation reste encore variable, et si Bach donne peu d'indications en ce sens, Rameau, en revanche, se veut assez précis. Dès la fin du siècle, les *crescendo* et *decrescendo* sont notés dans les partitions symphoniques, sous l'influence de l'École de Mannheim.

Les nuances musicales s'affinent naturellement au XIX^e siècle : le *ppp* fait son apparition dans la *Sonate Waldstein* op. 53 (1804) de Beethoven, et le *ffff* dans la *Symphonie fantastique* (1830) de Berlioz.

Dans la musique contemporaine, la dynamique fait intégralement partie du matériau sonore, au même titre que le timbre ou la hauteur.

2. Les logarithmes

Ils revêtent une importance fondamentale en acoustique, car l'audition des paramètres musicaux, comme d'ailleurs presque toute la perception sensorielle, suit en grande partie une allure logarithmique.

Les étudiants peu ou pas familiarisés avec ce type de calcul trouveront ci-dessous un rappel de quelques notions élémentaires leur permettant de comprendre les démonstrations et d'utiliser eux-mêmes les logarithmes pour leur propre usage.

2.1. Définition

On appelle progression une suite de nombres dont chacun est relié au précédent par une loi ou « raison ». Une progression géométrique signifie que la loi est la multiplication ; la raison d'une progression arithmétique est la loi d'addition.

Considérons tout d'abord une progression géométrique de raison 10 commençant par 1 :

1 10 100 1000 10 000 100 000

Chaque nombre est bien égal au terme précédent multiplié par 10. Nous pouvons également exprimer chacun des termes de la progression par une puissance de 10 :

10^0 10^1 10^2 10^3 10^4 10^5

Considérons maintenant une progression arithmétique de raison 1 commençant par 0 :

0 1 2 3 4 5

Faisons enfin coïncider les deux progressions à partir de leur origine ; appelons N la progression géométrique, L la progression arithmétique, et traçons une demi-droite correspondant à ces divisions :

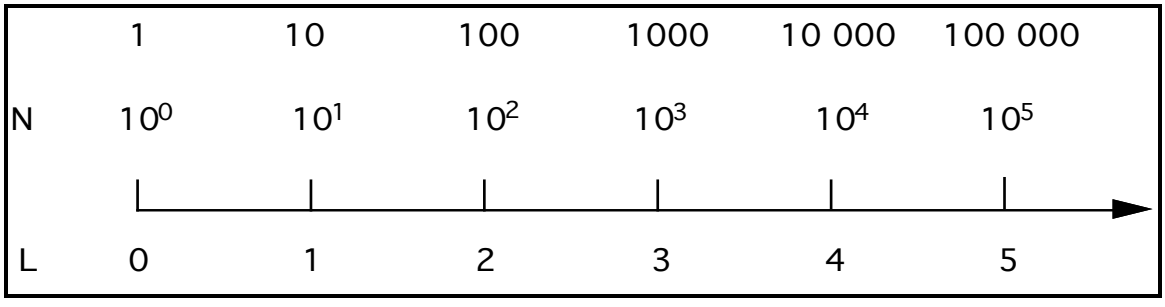


Fig. 57 : progression logarithmique

On écrit par convention :

$\log 1 = \log 10^0 = 0$

$\log 10 = \log 10^1 = 1$

$\log 100 = \log 10^2 = 2$

Le logarithme d'un nombre N est donc celui qui lui correspond sur la ligne L (fig. 57). Nous constatons également que l'exposant d'une puissance de 10 exprime son logarithme. Ex. : $\log 10^{1,3} = 1,3$

En généralisant cette propriété, nous écrirons :

$$N = 10^L \qquad (37)$$

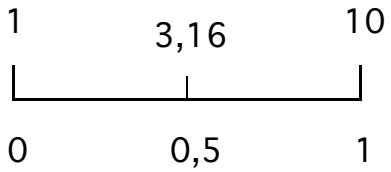
Du fait que la progression N est de raison 10, ces logarithmes sont appelés décimaux (ou vulgaires). Il en existe d'autres sortes, notamment les logarithmes népériens, mais nous n'utiliserons pratiquement que ceux-là[1].

Nous remarquons que le rapport entre la demi-droite et la ligne L est simple : à des longueurs de segments égaux correspondent des intervalles numériques égaux (puisque la progression est arithmétique). Il en va autrement pour la ligne N : le premier segment comprend les nombres 1 à 9, le deuxième 10 à 99, le troisième 100 à 999, etc. Les nombres de la série N correspondent à des longueurs de plus en plus petites.

Exemple : à quel nombre N correspond 0,5 sur la ligne L ? En d'autres termes, quel nombre a 0,5 pour logarithme ?

Appliquons la relation 37 :

$$N = 10^{0,5} = 10^{1/2} = \sqrt{10} = 3,16$$



Comme le montre le schéma ci-dessus, la valeur 0,5 se place entre 0 et 1 pour la ligne L ; mais du fait que les divisions sont de plus en plus petites pour la ligne N, on ne peut y localiser un nombre, hormis les puissances de 10, que par le calcul. L'exemple proposé permet donc d'écrire :

$$\log 3,16 = 0,5$$

Fort heureusement, les tables de logarithmes, les règles à calcul (aujourd'hui obsolètes) et les calculatrices fournissent ces résultats tout prêts, et il est facile de connaître le logarithme, ou correspondant sur la ligne L, de n'importe quel nombre N.

2.2. L'expression logarithmique

Observons les valeurs suivantes :

$\log 2 = 0,301$
$\log 20 = 1,301$
$\log 200 = 2,301$

Nous remarquons qu'un logarithme se compose de deux parties distinctes : une à droite de la virgule, appelée *mantisse*, qui ne varie pas lorsque le nombre N est multiplié par 10 ou par une puissance de 10 ; l'autre partie, à gauche de la virgule, est appelée *caractéristique* et varie en fonction de N : elle est égale au nombre de chiffres constituant N, moins 1. On comprend pourquoi en examinant la figure 57 : le nombre 150, par exemple, possède 3 chiffres, la caractéristique de son

[1] Remarquer toutefois que la formule d'Eyring (22) p. 68 utilise les logarithmes népériens.

logarithme vaut donc 3 – 1 = 2, comme pour tous les nombres situés entre 100 et 1000. Le décalage vient de ce que la série N commence par 1 et la série L par 0.

2.3. Propriétés opératoires

Les logarithmes permettent, le cas échéant, de simplifier les calculs. Voici brièvement rappelées quelques équivalences bien connues :

$$\log A \times B = \log A + \log B \tag{38}$$

$$\log \frac{A}{B} = \log A - \log B \tag{39}$$

$$\log \sqrt[n]{A} = \log \frac{A}{n} \tag{40}$$

$$\log A^n = n \log A \tag{41}$$

Exemple : soit à trouver le logarithme de 5 :

$$\log 5 = \log \frac{10}{2} = \log 10 - \log 2$$

$$1 - 0,3 = 0,7$$

On peut démontrer de la sorte que les nombres inférieurs à 1 ont un logarithme négatif :

$$\log 0,2 = \log (2 \times 10^{-1}) = \log 2 + \log 10^{-1}$$

$$= 0,301 - 1 = - 0,699$$

Les logarithmes sont très utiles lorsque la grandeur des phénomènes est considérable. Par exemple, dans certaines conditions, l'écart entre les sons les plus faibles perçus par l'oreille et les sons les plus forts peut être de 1 à cent mille milliards, soit 1 à 100 000 000 000 000… Il est préférable d'exprimer ce rapport sous forme logarithmique, et d'utiliser une échelle plus comprimée, variant en l'occurrence de 0 à 14.

2.4. Le Bel et le décibel

Nous avons vu que la distance logarithmique était identique entre 1 et 10, 10 et 100, 100 et 1000, …, et chaque fois égale à log 10 = 1.

Par convention, ce gain de 1 (log 10) est considéré comme l'unité, et appelé Bel (symbolisé B). Cette valeur de 1 B représente donc le gain d'intensité quand le rapport des sources est égal à 10. Par exemple :

$$\log \frac{10000}{1000} = \log \frac{10^4}{10^3} = 1 \text{ B}$$

Le Bel exprime donc un rapport d'intensité décrit par son logarithme : un rapport de 10 à 1000 représente un gain de :

$$\frac{1000}{10} = 100$$

$$\log 100 = 2 \text{ B}$$

Entre 1 et 20 violons, le gain est de :

$$\log 20 = 1,3 \text{ B}$$

D'une façon générale, nous dirons que le niveau L d'intensité en Bels est égal à :

$$L_B = \log \frac{I_2}{I_1} \tag{42}$$

où I_1 est la puissance initiale, et I_2 la puissance finale.

Le Bel est une unité peu maniable, parce que trop grande ; c'est pourquoi, dans la pratique, on le subdivise en utilisant sa 10e partie, le décibel, symbolisé dB.

$$1 \text{ B} = 10 \text{ dB}$$

L'équation 42 devient alors :

$$L_{dB} = 10 \log \frac{I_2}{I_1} \tag{43}$$

2.5. Niveau de référence : la valeur 0 dB

Jusqu'à présent, nous avons comparé des intensités entre elles et évalué le gain résultant de leur augmentation. Mais comment mesurer un gain à partir d'une source initiale ? Par exemple, un violon joue dans une salle ; il représente l'intensité finale I_2. Que vaut I_1 dans ce cas de figure ?

Il est indispensable de définir une référence, un point de départ pour graduer une échelle de gain et pouvoir effectuer des calculs.

Par convention, on appelle 0 dB la puissance minimale nécessaire pour qu'un son de 1000 Hz soit statistiquement tout juste audible. Cette intensité mesurée est égale à :

$$10^{-12} \text{ watts/m}^2$$

La formule 43 s'écrit donc :

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} \tag{44}$$

avec I l'intensité finale, ou totale, et I_0 l'intensité de référence égale à 10^{-12} watts/m^2.

En pratique, il est difficile de mesurer l'intensité d'une onde sonore, c'est-à-dire l'énergie traversant des couches d'air successives considérées comme unités de surface. Il est beaucoup plus facile d'obtenir la valeur de la pression, exercée par exemple sur la membrane d'un microphone. La pression minimale nécessaire à l'audition d'un son de 1000 Hz, équivalant à une intensité de 10^{-12} w/m^2, est égale à :

$$2 \cdot 10^{-5} \text{ Pascals (20 µPa)}$$

Sachant que l'intensité d'une onde est comme le carré de la pression qu'elle exerce, le niveau de pression en décibels L_p devient, en fonction de l'équation 44 :

$$10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)^2 = 10 \times 2 \times \log \frac{I}{I_0}$$

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \tag{45}$$

Le niveau 0 B (ou 0 dB) est donc la valeur au-dessous de laquelle un sujet statistiquement normal n'entend pas un son de 1000 Hz. Mais il est tout à fait possible, pour une ouïe plus fine que la normale, de percevoir cette hauteur au-dessous de 0 dB. Cela n'a rien d'exceptionnel. D'ailleurs, l'oreille humaine présente à 3700 Hz une acuité plus fine de 8 dB en moyenne qu'à 1000 Hz.

2.6. Applications numériques

1) Quelle est l'intensité acoustique d'un son de 40 dB ?
   40 dB = 4 B, soit un rapport de puissance de 1 à 10^4 par rapport au niveau de référence :

$$10^{-12} \times 10^{4} = \boxed{10^{-8}\ \text{w/m}^2}$$

2) Quel est le niveau en décibels d'une trompette développant une intensité acoustique de $4 \cdot 10^{-3}$ W/m^2 ?

En application de la formule 44, nous posons :

$$L = 10\log 4 + 10\log\frac{10^{-3}}{10^{-12}}$$

$$= 10 \log 4 + 10 \log 10^{9}$$

$$= 6 + 90 = \boxed{96\ \text{dB}}$$

3) Quel niveau de pression sonore correspond à 64 dB ?

Cherchons d'abord le logarithme du facteur représentant l'accroissement de P_0 ; les intensités étant égales au carré des pressions, nous posons :

$$\frac{64}{20} = 3,2$$

Transformons maintenant cette valeur logarithmique en nombre N :

$$N = 10^{L} = 10^{3,2} = 1584,9$$

ce qui permet de calculer l'accroissement de pression à partir du niveau de référence :

$$1584,9 \times 2 \cdot 10^{-5} = 3,17 \cdot 10^{-2}\,Pa$$

Les calculs ci-dessus mettent en évidence la formule générale permettant de transformer un niveau d'intensité exprimé en décibels en une valeur de pression en pascals :

$$p = 10^{\frac{L}{20}} \times p_0 = \left(\sqrt[20]{10}\right) \times p_0 \qquad (46)$$

On remarque que cette formule ne contient qu'une seule variable, L. Il est donc possible d'exprimer numériquement la racine 20^{e} de 10 et p_0 qui sont des constantes :

$$p = (1,122)^{L} \times 2 \cdot 10^{-5} \qquad (47)$$

2.7. L'addition des niveaux en décibels

Il ressort de la formule 44 qu'un doublement de l'intensité sonore équivaut toujours à un gain de 3 dB. En effet :

$$10\log\frac{2I}{I} = 10\log 2 = 3\ \text{dB}$$

En conséquence :

20 dB + 20 dB = 23 dB
60 dB + 60 dB = 63 dB
etc.

Le même doublement exprimé en niveau de pression donnera :

20 dB + 20 dB = 26 dB
60 dB + 60 dB = 66 dB

puisque :

$$20\log\frac{2p}{p} = 20\log 2 = 6\ \text{dB}$$

Cela signifie que le fait d'ajouter 20 dB aux 20 dB d'origine augmente le niveau d'intensité de 3 dB et le niveau de pression de 6 dB.

Le gain obtenu en ajoutant deux intensités égales est donc faible, et d'autant plus lorsque les intensités sont différentes. Dans ce cas, la plus petite devient vite négligeable par rapport à la plus grande. Soit par exemple trois niveaux d'intensité, respectivement 78 dB, 74 dB, et 71 dB. Leur somme se calcule ainsi :

$$10^0 + 10^{-0,4} + 10^{-0,7} = 1,6$$

$$10 \log 1,6 = 2$$

$$78 + 2 = 80 \text{ dB}$$

La première ligne convertit en nombres N, selon la relation 37, les différences exprimées en décibels existant entre les trois sons ; 10^0 signifie qu'il n'y a (évidemment) pas de différence entre la première valeur et elle-même ; les autres intensités sont comparées à la plus forte : – 4 dB pour le deuxième, – 7 dB pour le troisième. Cette démonstration s'applique bien entendu au cas du doublement de la source. Soit par exemple l'addition de deux sons de 75 dB chacun :

$$10 \log (10^0 + 10^0) = 10 \log 2 = 3$$

$$75 + 3 = 78 \text{ dB}$$

CHAPITRE XI

LA SENSATION DE NIVEAU

1. Mesure de la sensation de niveau

1.1. Loi des seuils de Weber

Au XIX^{e} siècle, Ernst Heinrich Weber (1795-1878) fut l'un des pionniers de la psychophysiologie sensorielle. Il s'intéressa particulièrement aux seuils de perception différentielle, c'est-à-dire aux différences d'intensité nécessaires entre deux stimulations pour qu'une différence entre elles soit perçue.

Après de nombreuses expériences, il énonça un théorème dit *loi de Weber*, ainsi formulé :

« la plus petite augmentation de stimulus capable de provoquer un accroissement de sensation est une fraction constante du stimulus précédemment appliqué ».

Weber avait d'abord étudié le toucher et la sensation de poids : lorsqu'on tient un certain poids dans la main, combien faut-il ajouter pour obtenir la sensation de poids immédiatement supérieure ?

Environ 5 %, soit 1/20^{e} du poids initial. Pour 100 g (I), il faut ajouter 5 g (ΔI), pour 500 g, 25 g, et pour 1 kg, 50 g. Nous obtenons donc le rapport constant :

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{5}{100} = \frac{25}{500} = \frac{50}{1000} = 0,05$$

1.2. Loi de Fechner

Les résultats obtenus par Weber dans le domaine de l'intensité sonore n'ont pas été probants, et c'est à un autre savant allemand, Gustav Theodor Fechner (1801-1887), que revient le mérite d'avoir découvert une loi, sinon rigoureusement juste, qui fournit du moins des données valables en première approximation. La loi de Fechner énonce que *« la sensation varie comme le logarithme de l'excitation ».*

Cette loi a une portée générale, et s'applique à toutes nos perceptions sensorielles — de façon plus ou moins régulière — à la vision comme au goût, quoique pour celui-ci une mesure chiffrée soit difficile à obtenir, et dépende encore plus largement des facteurs subjectifs.

1.3. Application

D'après la loi de Fechner, lorsque l'intensité d'un stimulus augmente selon une progression géométrique, la sensation correspondante n'augmente pas d'autant, mais seulement selon une progression arithmétique.

Par exemple, soient 10 choristes : si 8 autres choristes viennent s'ajouter aux précédents, nous aurons un accroissement de stimulation de 10 à 18, soit le rapport :

$$\frac{18}{10} = 1,8$$

La sensation d'intensité n'augmentera que du logarithme de cette valeur, c'est-à-dire :

$$\log 1,8 = 0,25$$

De même, quand une source est doublée, le gain d'intensité est constant, quelle que soit la valeur de cette source. Par exemple :

20 + 20
30 + 30
40 + 40

représentent le même rapport d'excitation (40/20, 60/30, 80/40), c'est-à-dire 2 ; le gain de sensation est toujours le même, à savoir :

$$\log 2 = 0{,}3$$

2. Le champ auditif humain

L'oreille est limitée, pour sa perception des hauteurs, dans le grave et dans l'aigu, et pour l'intensité, par les sons trop faibles ou trop forts pour donner lieu à une sensation auditive. Ces limites déterminent un ensemble, le champ auditif humain, à l'intérieur duquel n'importe quelle fréquence pourra être entendue.

2.1. Le diagramme de Wegel

Ce diagramme trace les contours du champ auditif humain (fig. 58). Il montre que le système auditif n'est pas un capteur linéaire, c'est-à-dire qu'il n'entend pas et ne transmet pas au cerveau les fréquences qu'il perçoit avec la même intensité.

2.1.1. Limites et courbes des seuils

La limite inférieure, ou courbe du seuil de perception, délimite le niveau au-dessous duquel un son est trop faible pour être entendu. Cette courbe est considérablement relevée pour les graves comme pour les aigus : un son de 50 Hz est perçu au seuil d'audibilité à 60 dB environ, alors que moins de 20 dB sont nécessaires pour 200 Hz, et par définition 0 dB pour 1000 Hz.

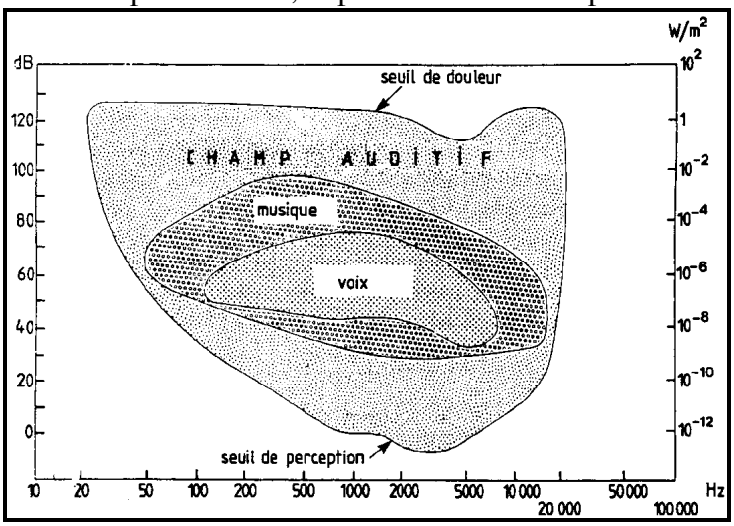


Fig. 58 : le champ auditif humain

La limite supérieure indique l'intensité à partir de laquelle un son devient douloureux. Cette courbe est presque plate, comparée à celle du seuil d'audibilité. Cela signifie qu'à partir de 120 dB environ, tout son devient douloureux et même dangereux.

Pour les hauteurs, ce diagramme montre aussi qu'une oreille statistiquement normale entend dans le meilleur des cas de 16 Hz à 20 000 Hz environ. Les fréquences inférieures à 16 Hz sont des infrasons, au-delà de 20 000 Hz commence le domaine des ultrasons.

Il est possible de faire figurer, à l'intérieur du champ auditif, différents sous-ensembles correspondant à des activités sonores particulières (parole, musique, etc.)

2.1.2. La zone sensible de l'oreille

La courbe du seuil d'audibilité met en évidence que l'oreille a besoin de très peu d'énergie pour entendre certains sons. On appelle *zone sensible de l'oreille* (ZSO) les fréquences comprises, au sens large, entre 500 et 5000 Hz, et plus spécialement l'octave comprise entre 2000 et 4000 Hz.

Les conséquences musicales de cette propriété auditive sont nombreuses, et ont été largement exploitées dans certains domaines, comme la lutherie par exemple. C'est également dans la ZSO que la marge entre les sons faibles et les sons forts (la dynamique) est la plus étendue : le seuil de douleur y représente une puissance mille milliards de fois supérieure à celle du seuil d'audibilité… (d'où l'intérêt d'utiliser les décibels, c'est-à-dire une échelle logarithmique).

2.2. Le diagramme de Fletcher

Le diagramme de Wegel donne des renseignements sur les seuils, sur les limites de l'audition, mais ne fournit pas d'indications sur le comportement de l'oreille à l'intérieur du champ auditif, et donc sur l'évolution de la sensation avec l'augmentation de l'intensité. C'est précisément ce point qu'éclaire le diagramme de Fletcher (fig. 59).

2.2.1. Les courbes isosoniques

Tout d'abord, observons comment se construit ce diagramme. On fait entendre à un sujet un son de 1000 Hz, qui sera la fréquence de référence, à une intensité de 40 dB : on lui présente ensuite d'autres sons à d'autres hauteurs, qu'il doit régler subjectivement à la même intensité que celle de la référence, soit à 40 dB ; on note soigneusement à quels niveaux réels, en décibels, le sujet a réglé les différents sons, et ces valeurs sont portées sur un diagramme identique à celui de Wegel. Tous ces points sont enfin reliés entre eux : sur la courbe obtenue, figurent donc tous les sons qui, subjectivement, sonnent aussi fort que 1000 Hz à 40 dB.

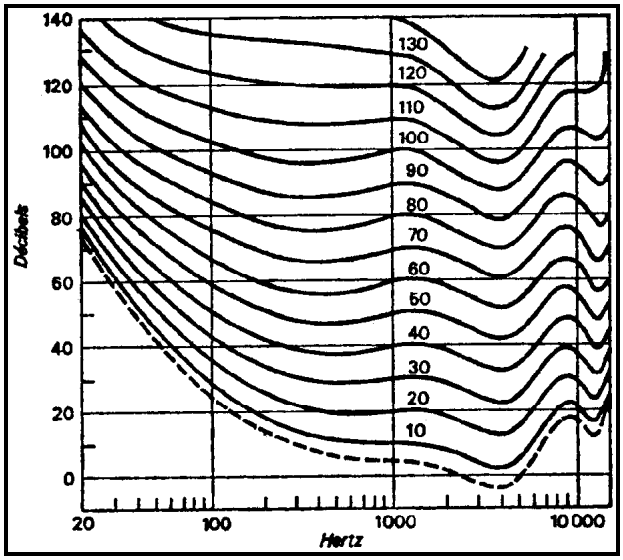


Fig. 59 : le diagramme de Fletcher

Les sons ainsi repérés étant tous perçus au même niveau, la courbe est appelée courbe isosonique ; tous les sons de la courbe ont la même *sonie*, c'est-à-dire la même intensité subjective.

L'expérience est poursuivie en prenant tour à tour la référence 1000 Hz à toutes les valeurs d'intensité de 10 en 10 dB, auxquelles sont comparées un échantillon d'autres fréquences, de 20 à 20 000 Hz. On obtient ainsi une série de courbes isosoniques, échelonnées par 10 dB (fig. 59).

2.2.2. Mesure de la sonie : le phone

Tous les sons d'une courbe isosonique ont des intensités physiques différentes, mesurées en décibels, mais des intensités subjectives égales, c'est-à-dire une même sonie. Il est donc possible de définir une unité d'intensité subjective, l'unité de sonie : c'est le phone, symbolisé Ph. À 1000 Hz, par définition, l'intensité physique et la sonie sont égales, puisque tous les sons ont été comparés à cette fréquence-étalon.

On pose donc :

$$1 \text{ Ph} = 1 \text{ dB à } 1000 \text{ Hz}$$

Ainsi, un son de 1000 Hz à 50 dB possède forcément une sonie de 50 Ph, mais à 100 Hz, 50 Ph représentent 60 dB, comme on peut le constater sur la figure 59. De même, 60 dB est l'énergie nécessaire pour obtenir tout juste 0 Ph à 20 Hz.

2.2.3. La non-linéarité de l'audition

L'examen des courbes isosoniques confirme la non linéarité du système auditif, et les variations de son comportement en fonction de l'intensité et de la fréquence des sons entendus.

Les courbes se redressent au fur et à mesure que l'intensité augmente, et à partir de 100 Ph, le niveau perçu se rapproche du niveau physique. Il est d'ailleurs normal que les courbes de Fletcher ressemblent de plus en plus à celle du seuil de douleur de Wegel.

Dans la ZSO, les courbes isosoniques restent à peu près parallèles, ce qui n'est pas le cas aux extrêmes du spectre (sur le diagramme, les hautes fréquences ne sont pas représentées). L'intervalle entre deux échelons est plus court aux faibles intensités qu'aux fortes. La dynamique auditive, c'est-à-dire le rapport entre les intensités extrêmes, est plus petite, plus ramassée dans le grave que dans la ZSO ; l'oreille y est moins sensible aux nuances, les échelons de sensations sont plus proches les uns des autres : la sonie croît plus vite aux fréquences extrêmes que dans la zone sensible. Ceci explique pourquoi il est plus facile d'apprécier de subtiles variations d'intensité sur un violon que sur une contrebasse.

Le relèvement des courbes isosoniques de part et d'autre de la ZSO est responsable d'une interférence entre le timbre et le niveau sonore. En effet, considérons une chaîne hi-fi diffusant de la musique à un niveau de 90 dB. Si l'on baisse le son de 50 dB, en agissant sur le potentiomètre de volume, le niveau de reproduction tombe à 40 dB : en conséquence, toutes les fréquences nécessitant plus que cette valeur pour se trouver au-dessus du seuil d'audibilité disparaissent du spectre sonore, qui se trouve ainsi amputé de ses composants graves et aigus, et dont le timbre s'appauvrit de façon non négligeable.

C'est d'ailleurs la raison pour laquelle est prévu, sur certains préamplificateurs, un filtre actif souvent appelé *loudness*, et dont la fonction est de relever artificiellement, aux bas niveaux d'écoute, l'intensité des fréquences extrêmes du spectre sonore.

2.2.4. Dynamique et nuances musicales

Les propriétés de l'oreille mises en évidence par le diagramme de Fletcher permettent de mieux comprendre le problème des nuances en musique, et particulièrement le rapport entre ce qui est écrit sur la partition et ce qui est effectivement joué.

Dans une salle de concert, où le silence n'est jamais total, le bruit de fond atteint environ 40 dB ; sachant qu'un *fortissimo* dépasse rarement 110 dB, la dynamique pratique (ou rapport signal/bruit) de la salle est dans ces conditions de : 110 – 40 = 70 dB.

Par ailleurs, la notation de l'intensité utilise couramment une échelle allant du *ppp* au *fff* en passant par le *mf*, ce qui représente 7 échelons d'intensité. Cette échelle recouvre parfaitement le rapport S/B de la salle, les 7 nuances correspondant aux 7 Bels de dynamique.

Attention toutefois à ne pas commettre de contresens : l'écart séparant deux nuances voisines est effectivement de 1 Bel, et l'expérience montre que 10 dB correspondent bien à la plus petite valeur moyenne contrôlable par un musicien en situation de jeu (et non d'expérimentation). Mais, d'une

part, cela ne signifie pas que l'oreille ne puisse apprécier des variations de niveau plus petites : dans les meilleures conditions, il est possible d'entendre une différence de 1 dB entre deux sons. Toutefois cet écart est beaucoup trop étroit pour être produit volontairement et contrôlé par un instrumentiste.

D'autre part, le fait que les nuances correspondent aux 70 dB de dynamique n'implique pas une coïncidence terme à terme des deux échelles : un *pp* n'est pas forcément égal à 50 dB, ou un *forte* à 90 dB, comme nous le verrons plus loin. Il ne faut surtout pas confondre rapport d'intensité et valeur absolue.

Enfin, que l'écriture de l'intensité dépasse parfois 7 échelons, notamment dans la musique contemporaine, ne remet pas en question ce qui vient d'être exposé. D'abord parce qu'une nuance de plus ou de moins ne change pas grand-chose à sa valeur ; mais surtout parce qu'il n'est pas évident que les possibilités pratiques des interprètes s'accroissent avec l'extension de l'écriture, et qu'un *ppppp* représente réellement deux échelons de moins qu'un *ppp*. Ces notations n'en ont pas moins leur utilité, et agissent forcément sur le comportement des instrumentistes.

3. Facteurs modifiant la perception de l'intensité

Les caractéristiques générales de la perception de l'intensité sont le plus souvent déduites de données moyennes, obtenues statistiquement, sans tenir compte des facteurs individuels pouvant modifier les performances du système auditif. Ces éléments impondérables ne doivent cependant pas être négligés, car ils éclairent les comportements auditifs individuels.

3.1. La prévisibilité des événements sonores

La prévisibilité est la faculté qui permet au système auditif de s'adapter à l'intensité des signaux sonores. L'opération est effectuée par les muscles de l'oreille moyenne, qui modifient, sur ordre du cerveau, le plus souvent par voie réflexe, le niveau transmis à l'oreille interne.

Cette régulation est une activité permanente, conditionnée par la structure sonore de l'environnement. Les muscles ossiculaires, par leur contraction, protègent l'oreille interne des intensités pouvant l'endommager ou simplement provoquer la gêne ou la douleur.

Mais surtout, l'adaptation à chaque instant du niveau sonore apparaît comme une nécessité pour le système nerveux central, qui utilise toutes sortes de radars et de détecteurs pour prévoir l'intensité immédiate, comme la vision (nous *voyons* qu'une porte va claquer) ou la conscience de la situation (le spectacle terminé, nous *savons* que le public va applaudir).

Ce servo-réglage de l'intensité est tout à fait comparable à l'action de la pupille de l'œil pour la lumière. Mais la conséquence d'un tel dispositif est que, contrairement à ce qui se passe pour la hauteur, il ne peut exister aucune référence fixe du niveau sonore : l'oreille absolue n'existe pas pour l'intensité, personne ne peut à coup sûr évaluer un niveau en décibels ou en phones. Il faudrait pour cela connaître à tout moment l'état de contraction de sa musculature auriculaire, ce qui est évidemment impossible.

C'est la raison pour laquelle la tentative d'introduire un appareil de mesure, le décibelmètre, dans la pratique musicale s'est soldée par un échec. Cette idée un peu étrange fut cependant, voici quelques dizaines d'années, défendue par un chef d'orchestre prestigieux, Léopold Stokowski, alors directeur de l'Orchestre Philharmonique de New York. Il imagina d'affecter chaque nuance d'une valeur absolue, du *ppp* à 20 phones au *fff* à 95 phones, et d'en contrôler soigneusement la valeur en cours d'exécution grâce à un décibelmètre posé sur son pupitre. Personne ne fut satisfait des résultats, à commencer par lui-même sans doute. Faut-il s'en étonner ? Non, bien sûr. À cause du phénomène de prévisibilité, la valeur d'une nuance dépend du contexte musical, et deux *forte* identiques seront perçus différemment selon qu'ils sont précédés d'un *pp* ou d'un *ff*.

3.2. Altérations de l'audition

En dehors du phénomène normal de régulation et d'adaptation de l'intensité sonore, toutes les altérations ou affections de l'audition, temporaires ou définitives, sont bien entendu des facteurs à

prendre en compte pour l'étude du comportement auditif individuel. C'est ici le domaine de l'hypoacousie, de la surdité au sens le plus large du terme, et qui fera l'objet d'une étude à part (au chapitre suivant).

CHAPITRE XII

LA SURDITE

Dans son acception la plus générale, la surdité peut être définie comme *« toute élévation du seuil de perception »*. Une élévation de ce seuil pour un son quelconque signifie qu'il lui faut plus de puissance pour être entendu. Il est donc préférable de parler d'hypoacousie plutôt que de surdité, qui pourrait laisser croire à une absence totale d'audition.

1. L'audiogramme tonal

1.1. Présentation

Pour comprendre la surdité et pouvoir la combattre, il faut bien la connaître, et être capable de la dépister et de la mesurer. Il existe pour cela un test simple et efficace, au moins dans une première approche, l'*audiogramme tonal par conduction aérienne* (ou tout simplement audiogramme), réalisé par un appareil appelé audiomètre.

Le patient est muni d'un casque d'écoute, et ses deux oreilles sont testées séparément. L'opérateur lui propose des sons (généralement sinusoïdaux) dont il augmente progressivement l'intensité. Dès que le patient les entend, il appuie sur un bouton ou fait un signe ; ces valeurs sont chaque fois reportées sur un diagramme comportant la fréquence en abscisse, et les gains ou pertes exprimés en décibels par rapport à un axe de référence en ordonnée (cf. fig. 60). Les fréquences s'échelonnent le plus souvent en octaves, de 125 à 8000 Hz, mais des valeurs intermédiaires peuvent également être utilisées.

Le seuil d'audibilité pour chaque oreille est ainsi établi. L'audiogramme révèle les éventuelles déficiences auditives et aide au diagnostic. Il apprend également que, chez un sujet normal, les deux oreilles entendent rarement de façon identique, et que les courbes ne se confondent pratiquement jamais avec l'axe de référence.

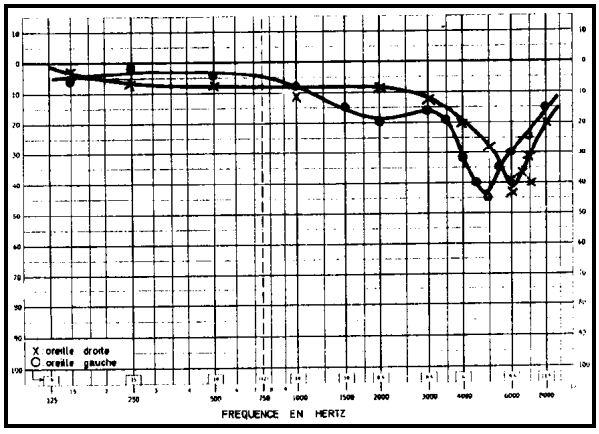


Fig. 60 : l'audiogramme tonal

1.2. Le niveau de référence

Sur un audiogramme, les écarts par rapport l'axe de référence sont évalués en décibels, par échelons de 5 dB. Cet axe de référence est noté 0. Cela ne signifie pas 0 dB, car alors, ne pas entendre les basses et les hautes fréquences à ce niveau serait tout à fait normal, et exprimer des déficits de 15 ou 20 dB pour une oreille saine n'aurait guère de sens. Cet axe de référence n'est autre que la courbe 0 Ph du diagramme de Wegel, c'est-à-dire le seuil d'audibilité statistiquement normal. Ainsi, l'audiomètre, réglé sur 0 à la fréquence 125 Hz délivre un signal de 40 dB environ, comme on peut le constater en se reportant à la figure 62.

2. Les différents types de surdité

2.1. Les surdités temporaires

Les surdités temporaires sont celles qui disparaissent d'elles-mêmes, sans intervention thérapeutique. Nous en distinguerons deux types principaux, les surdités dues à la fatigue, et les surdités accidentelles.

2.1.1. La fatigue auditive

Elle peut durer de quelques secondes à plusieurs dizaines d'heures, et se traduit aussi bien par une diminution temporaire de l'acuité auditive que par l'abaissement du seuil de douleur (les sons deviennent plus facilement douloureux).

Dans le premier cas, la fatigue est plutôt d'ordre neurologique, et concerne les centres nerveux de l'audition ; dans le second cas, c'est la musculature de l'oreille moyenne qui est généralement touchée.

2.1.2. Mesure de la fatigue auditive

Comment mesurer la fatigue ? Par le temps nécessaire à la récupération d'une audition normale.

C'est le principe du *test de Peyser* : on diffuse à un sujet muni d'un casque un son de 1000 Hz, à 10 dB, pendant 3 minutes ; après 15 secondes de repos, on mesure son seuil d'audition à 1000 Hz : s'il est plus élevé de 5 dB que d'habitude, c'est normal ; si le déficit est supérieur à 10 dB ou plus, la mesure est recommencée de 30 secondes en 30 secondes jusqu'au retour à la normale. Il est évident que plus le temps de récupération est long, plus l'oreille est fatigable.

L'oreille ne se fatigue pas uniformément sur toute l'aire audible. La ZSO est la plus fragile, et atteinte d'autant plus profondément que la fréquence excitatrice est proche de cette zone. D'ailleurs, plus la bande de fréquence excitatrice est étroite, plus ses effets sont sensibles sur le seuil d'audition : un bruit blanc est moins dangereux, à intensité physique égale, qu'un son sinusoïdal.

La fatigue musculaire ne se mesure pas précisément, mais ses effets se font sentir sur la dynamique auditive. Après avoir été soumis longtemps à un milieu bruyant, les muscles ossiculaires, s'étant beaucoup contractés pour protéger l'oreille interne, sont fatigués, et des sons même peu intenses — les contraignant néanmoins à un nouvel effort — peuvent être ressentis douloureusement. Il en résulte un abaissement du seuil supérieur tolérable, réduisant d'autant la dynamique auditive.

2.1.3. Les surdités accidentelles

Il existe des facteurs qui peuvent intervenir temporairement sur l'acuité auditive. Certaines affections du nez ou de la gorge, ou certains médicaments, occasionnent parfois des baisses de l'audition, normalement passagères.

2.2. La surdité de transmission

Ce type de surdité intéresse le système de transmission du son, c'est-à-dire l'oreille externe et l'oreille moyenne.

2.2.1. Les causes

Pour l'oreille externe, il s'agit le plus souvent de l'obstruction du conduit auditif, généralement par un bouchon de cérumen, qu'il est alors facile de dissoudre ou d'extraire.

Les surdités de l'oreille moyenne sont principalement le catarrhe, dû à l'obstruction de la trompe d'Eustache, les différentes formes d'otites, les traumatismes, déflagrations ou chocs crâniens susceptibles de déchirer le tympan, et surtout l'otospongiose, la plus typique des surdités de transmission.

2.2.2. L'otospongiose

Également nommée *otosclérose,* c'est l'ossification de l'étrier dans la fenêtre ovale. Celui-ci se développe anormalement jusqu'à se souder et s'immobiliser dans le cadre de la fenêtre. La chaîne des osselets ne peut plus vibrer et transmettre les sons à l'oreille interne.

Cette maladie atteint plutôt les femmes que les hommes (à près de 70 %) et est souvent héréditaire, sautant volontiers une génération. Elle est probablement liée à des facteurs hormonaux, et se manifeste à la puberté, est aggravée par la grossesse ou l'allaitement, et peut se stabiliser au moment de la ménopause.

2.2.3. Conséquences sur l'audition

L'otospongiose affecte essentiellement la perception des basses fréquences, c'est-à-dire que l'oreille se comporte alors comme un filtre passe-haut, laissant relativement intactes, au début tout au moins, les hautes fréquences. Cela entraîne des conséquences particulières sur l'audition.

L'intelligibilité de la parole, localisée surtout dans les hautes fréquences du spectre sonore, se trouve donc relativement peu touchée dans un premier temps : l'audition téléphonique, pauvre en aigu, reste possible.

Les sourds par otospongiose entendent mieux dans un bruit de fond élevé. Ce phénomène, appelé *paracousie*, n'est paradoxal qu'en apparence : il s'explique par le fait que dans le bruit, les non sourds élèvent la voix, et qu'en outre le bruit émerge surtout dans les basses fréquences, moins bien perçues par le sourd de transmission.

L'otospongiose provoque également un phénomène d'*autophonie*, c'est-à-dire une perception exagérément renforcée des sons de son propre corps, comme les bruits de mastication (le sujet doit cesser de mâcher pour entendre). Le son de sa propre voix (*side tone*) est perçu trop fort, ce qui entraîne une baisse réflexe du niveau vocal parlé. Cependant, le timbre reste inchangé, et la voix est modulée normalement.

Enfin, cette surdité s'accompagne d'*acouphènes*, c'est-à-dire de bruits internes, entendus dans la tête, généralement de basses fréquences, bourdonnements ou bruits blancs, comme des impressions de chutes d'eau, souffles, jets de vapeur, etc. D'ailleurs, contrairement à ce que certains pourraient croire, la surdité n'est pas « le monde du silence », mais bien au contraire un excès de bruits intérieurs, alors même que les sons extérieurs ne sont plus entendus.

2.2.4. Traitement de l'otospongiose

Il n'existe pas à l'heure actuelle de traitement préventif ou curatif de l'otospongiose. En revanche, la cophochirurgie (chirurgie de la surdité) permet des succès dans près de 95 % des cas.

Dès 1935, le Français Sourdille pratiqua la *fenestration*, c'est-à-dire le percement d'une nouvelle fenêtre au niveau du vestibule ; la chaîne ossiculaire restait immobile, mais les sons pouvaient se transmettre à la cochlée puisque la périlymphe vibrait à nouveau. Cependant, une perte de 25 à 30 dB demeurait inévitable.

L'idée de rendre mobile l'étrier est ancienne (Miot, 1889), mais a été reprise et améliorée par l'Américain Rosen en 1953 : c'est la *mobilisation*. Cette opération s'attaquait directement à la cause mécanique de la surdité, et tentait de libérer la fenêtre ovale soit directement par de légères pressions sur la tête de l'étrier, soit en perçant préalablement tout autour un léger pointillé (procédé du « timbre-poste » de Clerc). Dans ce cas, la récupération auditive pouvait être totale dans l'immédiat, mais dans plus de la moitié des cas, l'otospongiose se réactivait au bout de quelques années.

La fenestration et la mobilisation seules sont maintenant abandonnées. On pratique actuellement une *stapédectomie* partielle, c'est-à-dire une ablation des branches de l'étrier ; la platine laissée en place est préalablement percée d'un petit trou, et une tige de téflon, fixée à la branche descendante de l'enclume, coulisse travers cet orifice (téflon-piston transplatinaire, Shea, 1962). Il existe bien sûr des variantes, et des perfectionnements sont continuellement apportés à la chirurgie de l'otospongiose.

2.3. La surdité de perception

2.3.1. Les causes

Ce type de surdité concerne l'oreille interne. Les causes principales en sont les traumatismes sonores, les produits toxiques, et le vieillissement normal de l'individu.

Les traumatismes sonores peuvent être brusques et accidentels, mais les cas les plus significatifs sont dus à des expositions prolongées au bruit : c'est le domaine des surdités professionnelles. Les traumatismes sont d'autant plus importants que le bruit est aigu, intermittent, et bien sûr intense. À partir de 90 dB, tout bruit est traumatisant, et certaines machines dépassent largement les 100 dB.

Les lésions intéressent la cochlée et sont la conséquence directe de la localisation précise des fréquences le long de la membrane basilaire (tonotopie).

Cette infirmité est désormais reconnue maladie du travail, sous certaines conditions, par un décret de 1963. La liste des métiers et travaux susceptibles de provoquer une surdité à caractère professionnel s'est encore allongée par un nouveau décret promulgué en 1981. L'exposition doit être d'un an au minimum (durée réduite à un mois pour le travail sur les réacteurs) et le déficit constaté de 35 dB sur les deux oreilles.

Les substances toxiques susceptibles d'agresser le système auditif sont nombreuses : nicotine, oxyde de carbone et plomb (pots d'échappement) ; également certains médicaments, antibiotiques comme la streptomycine ou la néomycine, de même que la quinine et les anesthésiques généraux.

2.3.2. Aspects audiométriques

Comme nous l'avons vu, la surdité de perception concerne surtout les hautes fréquences.

La perte d'audition illustrée par la figure 61 est particulièrement sévère ; les basses fréquences ne sont que peu touchées, mais la chute est brutale à partir de 1000 Hz.

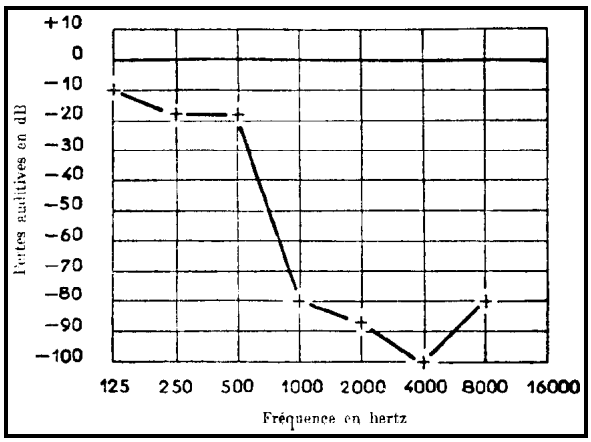


Fig. 61 : surdité de perception

L'exemple est encore plus frappant si l'on reporte ce seuil d'audibilité sur un diagramme de Wegel (fig. 62) : c'est l'audiogramme en valeurs de seuil, dont la courbe 0 Ph n'est pas redressée.

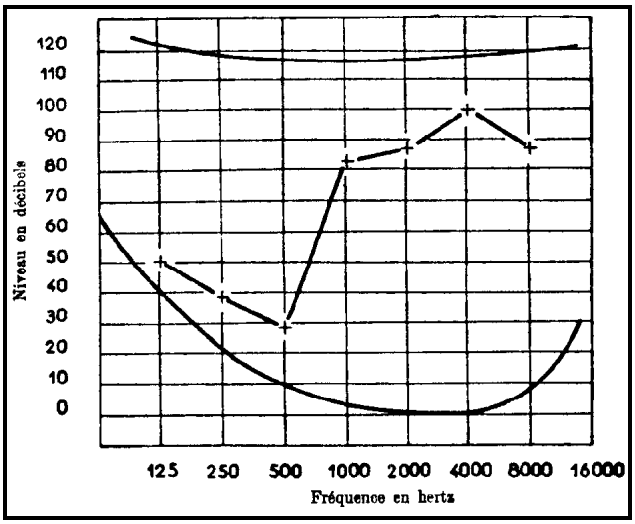


Fig. 62 : audiogramme en valeurs de seuils

2.3.3. Conséquences sur l'audition

Atteignant les hautes fréquences, la surdité de perception agit comme un filtre passe-bas, c'est-à-dire à l'inverse de la surdité de transmission. L'intelligibilité de la parole est par conséquent mauvaise, la réception téléphonique gravement perturbée, voire impossible. L'audition du bruit de fond, quant à elle, est privilégiée : le sujet entend qu'on lui parle, mais ne comprend pas ce qu'on lui dit.

La surdité de perception fait encore sentir ses effets sur le débit parlé du locuteur : la voix devient plus forte et surtout plus sourde, conséquence directe de la perte auditive des harmoniques aigus. De même, la modulation de la voix est plus monocorde et les intervalles ont tendance à rétrécir.

Les acouphènes se situent dans la zone des fréquences perdues : sifflements aigus, impressions de gazouillis d'oiseaux…

2.4. La presbyacousie

C'est l'augmentation progressive du seuil d'audibilité des fréquences élevées avec l'âge. Cette surdité, conséquence du vieillissement des individus, est donc évolutive.

La cause en est certainement une dégénérescence des cellules de Corti, du ganglion spiral et du nerf auditif, une atrophie des stries vasculaires, et une rigidité croissante de la membrane basilaire à partir de la base (d'où un déficit commençant dans l'aigu).

La presbyacousie débute en réalité très tôt, parfois vers 25 ans, mais fait rarement sentir ses effets avant 35 ans. Elle peut devenir réellement gênante à partir de 50 ans.

La figure 63 montre l'effet de la sénescence sur l'audition : les aigus sont plus touchés que les graves, et la perte de sensibilité est progressive. L'intelligibilité de la parole est davantage touchée que le niveau sonore, ce qui permet d'expliquer cette réaction typique des personnes âgées qui comprennent mal ce qu'on leur dit mais ne supportent pas que l'on parle trop fort.

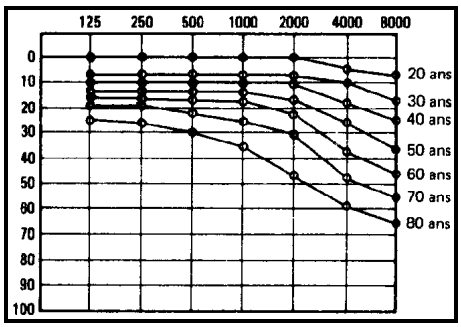


Fig. 63 : la presbyacousie

La presbyacousie est souvent à l'origine des divergences de jugement ou d'appréciation constatées entre musiciens d'âge très différent. La perception du timbre, notamment, cristallise les conflits de génération dans des domaines comme la lutherie (jugement sur la sonorité d'un instrument) ou la direction d'orchestre (balance de la couleur d'ensemble). La courbe de réponse du système auditif conditionne évidemment pour chacun une façon personnelle et unique d'entendre, et si tout le monde s'accorde théoriquement sur ce point, la pratique trahit encore bien des discussions oiseuses, et en tout cas inutiles, ayant simplement pour origine des oreilles qui n'entendent pas la même chose.

2.5. Les surdités centrales

Cette dénomination regroupe les lésions du système nerveux central, jusqu'au cortex. Dans les atteintes sous-corticales, l'altération auditive prend la forme d'une surdité de perception.

Si le cortex est concerné, c'est l'intégration du message qui est perturbée, pouvant se traduire par l'incompréhension du langage parlé (agnosie auditive), alors que l'oreille est intacte.

Entrent également dans cette catégorie les surdités psychosomatiques, d'origines névrotiques ou hystériques, dont les causes sont très diverses : choc affectif violent, traumatisme psychique lié à une explosion (guerre, attentat). Il est clair que ces cas ne relèvent pas de l'oto-rhino-laryngologie traditionnelle.

D'autres troubles auditifs, plus rares, peuvent encore se manifester. Un sujet muni d'un casque reçoit un même son alternativement à gauche et à droite : la *diplacousie* est le fait de ne pas entendre la même hauteur à chaque fois, et donc de percevoir un intervalle en passant d'une oreille à l'autre. En réalité, celles-ci ne perçoivent jamais exactement la même hauteur, mais l'écart reste normalement faible ; la diplacousie concerne une sensation d'intervalle supérieure au demi-ton.

Une autre affection, plus rare mais également plus difficile à déceler, est une distorsion de la sensation de hauteur appelée parfois *maladie de Fauré* (en référence aux troubles dont fut atteint ce compositeur à la fin de sa vie). Fauré entendait les graves environ une 3ce mineure trop bas, et les aigus une 3ce mineure trop haut. On peut imaginer la cacophonie qui résulte d'une musique ainsi anamorphosée. Progressivement, son audition intérieure fut atteinte à son tour, et la lecture même de la musique devint pour lui un supplice qui le contraignit à un silence définitif.

L'*amusie*, également très rare, est à ranger parmi les agnosies : c'est l'impossibilité de reconnaître une mélodie dans une succession de notes. Les organes sensoriels sont ici encore normaux, et c'est au niveau du cortex que se situe cette infirmité, comparable à certaines aphasies dans lesquelles le sujet entend une suite de mots sans pouvoir l'organiser en phrases ; de même pour les sons musicaux qui ne se structurent pas en une unité de niveau supérieur.

3. L'audiométrie

L'audiométrie est l'ensemble des techniques permettant de mesurer l'acuité auditive, de quantifier la baisse de la sensibilité, et par là même de dépister et d'identifier la surdité. L'audiométrie tonale utilise des sons sinusoïdaux, l'audiométrie vocale, les sons de la voix parlée.

3.1. Dépistage chez les enfants

Il ressort de ce que nous venons de voir que les différentes surdités ne produisent pas les mêmes effets, et qu'il n'est pas toujours aisé de les déceler, au moins de façon précoce. Ceci est particulièrement vrai chez les enfants.

Il est important, pour tous ceux qui se destinent une carrière d'enseignement, d'être sensible à ce problème, et en cas de doute, d'orienter les familles vers un médecin spécialiste.

3.1.1. Travaux de Gellé

À la fin du XIX^{e} siècle, Marie Ernest Gellé, médecin inspecteur de l'Instruction publique, fit paraître un travail capital sur l'otologie[1], dans lequel se trouve un chapitre, malheureusement peu remarqué à l'époque, consacré à l'audition à l'école : ayant testé l'acuité auditive d'un grand nombre d'élèves de l'enseignement primaire, de façon très simple, au moyen du tic-tac de sa montre de gousset, il établit une corrélation nette entre mauvais résultats scolaires et hypoacousie, celle-ci, dans presque tous les cas, non connue des intéressés, ni d'ailleurs des instituteurs. En bref, d'après Gellé, beaucoup de « cancres » entendent mal et n'en ont pas conscience. (Les reléguer au fond de la classe, pratique courante à l'époque, n'arrangeait évidemment pas les choses). Ayant besoin de plus de concentration pour comprendre, ils se fatiguent plus vite que leurs camarades, et leur attention tombe plus tôt.

3.1.2. Indices à surveiller

Une observation attentive de la part des maîtres ou des instituteurs peut permettre par le médecin un dépistage précoce. Quelques indices trahissent souvent une déficience auditive chez un enfant :

•son attitude : s'il est trop sérieux, pas assez bruyant lors des récréations, s'il penche anormalement la tête pour écouter ;

•le timbre de sa voix : s'il manque de clarté, s'il est sourd, ou trop grave, si la voix est monotone ;

•les fautes d'orthographe ou de prononciation : elles peuvent traduire une mauvaise compréhension due à une déficience auditive. C'est surtout la déformation systématique de certains sons qu'il faut surveiller, comme la transformation de consonnes sonores en sourdes (b→p, d→t, etc.). Ceci s'explique par le fait que la surdité de perception empêche d'entendre les harmoniques aigus des consonnes sonores, et la voix les reproduit alors difficilement.

3.1.3. Audiométrie statistique

Les travaux actuels confirment les observations de Gellé, et l'hypoacousie est reconnue comme une cause importante d'insuccès scolaire. D'autre part, les déficiences auditives, pas forcément très graves, sont plus répandues qu'on ne le croit généralement, comme l'ont montré des tests simples sur l'audition des hautes fréquences par des enfants de la région parisienne : la majorité d'entre eux n'entendaient pas jusqu'à 18 000 Hz, quelques-uns même présentaient une surdité sévère aux aigus, et ne le savaient pas.

3.2. Tests complémentaires

L'audiogramme tonal, pour utile qu'il soit, n'est pas suffisant. Il utilise la *conduction aérienne*, symbolisée CA, c'est-à-dire le son qui passe par l'oreille externe et moyenne avant de parvenir au labyrinthe.

Il est possible de recueillir des renseignements sur la seule oreille interne en utilisant la *conduction osseuse*, ou CO : pour cela, un vibrateur, délivrant des fréquences identiques à celles de l'audiogramme, est appliqué sur la mastoïde.

[1] M.E. Gellé, *L'audition et ses organes*, Paris, 1899.

La CA indique ce qu'entend réellement le sujet, et la CO, ce qu'il « devrait » entendre, puisque dans ce cas, seul son appareil de perception est en cause. Le principe de la plupart des tests complémentaires repose sur la comparaison de la CA et de la CO.

3.2.1. Le Rinné

Chez un sujet normal ou atteint de surdité de perception, les courbes de la CA et de la CO sont superposées : le Rinné est dit *nul* (CA = CO). Pour une surdité de perception, les courbes marqueront bien entendu un déficit, mais resteront superposées. Dans la surdité de transmission, la CA est moins bonne que la CO : le Rinné est alors *négatif*.

Il est également possible, avec des diapasons, de mesurer la *durée de perception*. Chez un sujet sain ou atteint de surdité de perception, le son est entendu pendant environ 30 secondes par conduction aérienne après sa disparition par conduction osseuse : le Rinné est *positif*. Dans le cas d'une surdité de transmission, c'est le contraire qui se produit : l'audition par conduction aérienne disparaît la première, la CO dure plus longtemps, et le Rinné est *négatif*.

3.2.2. Le Weber

Le Weber est un test permettant de comparer les oreilles entre elles. Un diapason ou un vibrateur est appliqué au sommet du crâne, sur la ligne médiane (vertex) : si le sujet entend le son aussi fort dans les deux oreilles à la fois, s'il n'y a pas de latéralisation, les oreilles sont normales ou atteintes identiquement, le Weber est *indifférent*.

À l'inverse, si le déficit est unilatéral ou si une oreille est plus touchée que l'autre, le sujet entend dans l'oreille la meilleure s'il s'agit d'une surdité de perception, et dans l'oreille la moins bonne dans le cas d'une surdité de transmission.

3.2.3. L'audiométrie vocale

L'audiogramme tonal, comme les tests de Rinné et de Weber, sont pratiqués avec des sons sinusoïdaux, ce qui a l'avantage d'être précis quant à la fréquence, mais assez éloigné des conditions réelles d'audition. C'est pourquoi il peut être utile de tester, et même de mesurer, chez un malentendant, la compréhension de la parole.

Le principe en est simple : des listes de mots soigneusement sélectionnés, (généralement dissyllabiques, de genre masculin et ne se terminant pas par un e muet) sont communiquées oralement au sujet isolé dans une cabine, à différents niveaux sonores ; on note le pourcentage de mots répétés correctement à chaque intensité, et des *courbes d'intelligibilité* peuvent être tracées. Des études statistiques ont montré que 50 % de mots compris sont nécessaires et suffisants pour assurer l'intelligibilité d'une conversation.

3.2.4. Test de Lee

Certains tests ont pour but de dépister les simulateurs de surdité (en cas d'expertise médicale, par exemple). Dans le *test de Lee*, également appelé *test d'Azzi*, un sujet muni d'un casque parle et entend sa voix avec un retard de quelques dixièmes de secondes : généralement, il bafouille et les efforts qu'il fournit pour s'exprimer normalement trahissent une audition correcte dans le casque. Cette expérience est facilement réalisable avec un magnétophone muni de deux têtes distinctes pour l'enregistrement et la lecture.

Ce test n'est bien sûr pas le seul utilisé pour déceler les simulations ou exagérations de surdité, mais il met en évidence l'importance d'un contrôle auditif correct pour une parole normale.

4. Conclusion

La surdité, contrairement à la cécité, est une infirmité mal admise par la société. Autrefois considérés comme malades mentaux et privés de leurs droits et privilèges de citoyens par le Code justinien (VI^{e} s. apr. J.-C.) les sourds sont encore aujourd'hui l'objet de moqueries (personnages

comiques malgré eux dans des films ou des bandes dessinées), et provoquent facilement l'impatience, voire l'irritation de leurs interlocuteurs : l'expression « sourd comme un pot » dit assez l'estime dans laquelle est tenu l'hypoacousique.

Le dépistage en milieu scolaire est tout à fait insuffisant. Des examens de la vue sont pratiqués périodiquement — et c'est une bonne chose —, mais l'équivalent n'existe pas pour l'audition. Or, même si certaines sont légères, les déficiences auditives sont nombreuses, avec leurs conséquences sur la scolarité.

L'ouïe est un sens bien malmené par notre époque, où la pollution sonore a pris une ampleur considérable. Les pratiques de certains jeunes aggravent encore sur eux-mêmes les effets du bruit. Ainsi les concerts ou l'écoute au casque à des niveaux sonores proches du seuil de douleur vieillissent prématurément l'oreille : une étude récente, effectuée aux États-Unis, a montré que les Américains de 20 ans présentent à l'heure actuelle le profil auditif de la génération des 40/50 ans. Ce que seront leurs oreilles dans vingt ans, nul ne peut le dire aujourd'hui…

Une baisse de la sensibilité auditive générale est de toute façon observée en milieu urbain ; certains chercheurs l'ont même baptisée *socioacousie*[1] tant son caractère collectif est prononcé.

L'homme devient-il sourd ? Le visuel prend-il irrémédiablement le pas sur l'auditif ? Si de telles questions relèvent heureusement encore du domaine de la spéculation, il n'en reste pas moins que l'audition est menacée, et que seule une prise de conscience rapide et active est en mesure de lui conserver son intégrité.

[1] J. Méry, «Presbyacousie et socioacousie», *Revue d'Acoustique,* n° 37, 1976.

CHAPITRE XIII

LA SENSATION DE HAUTEUR

1. Introduction

La hauteur est de toute évidence la plus importante des qualités subjectives du son. Comme nous l'avons vu précédemment (chap. X), ce paramètre fut le premier, parfois le seul, à avoir été fixé par l'écriture, et dès leur apparition, les plus anciens ouvrages sur la musique traitent de calculs de hauteur et d'intervalles.

L'audition est plus précise pour les hauteurs que pour les autres paramètres sonores. L'oreille absolue n'existe pas pour l'intensité (impossibilité due à la musculature ossiculaire) et si l'échelle des nuances comporte *grosso modo* 7 échelons, la musique utilise (en Occident du moins) 12 demi-tons par octave.

C'est également avec la hauteur que les exigences de précision sont les plus grandes. On ne dénature pas fondamentalement une œuvre musicale en en modifiant quelque peu les nuances, les timbres ou le tempo ; en revanche, quelques hertz de plus ou de moins peuvent dans certaines conditions faire grincer des dents…

2. La mesure de la hauteur

Nous savons que, d'une manière générale, la sensation de hauteur est proportionnelle à la fréquence d'une onde sonore, et par conséquent inversement proportionnelle à la longueur d'un tuyau ou d'une corde vibrante. Mais cette sensation suit ses lois propres et ne se conforme pas strictement aux phénomènes physiques.

2.1. Hauteur et logarithmes

Par rapport à la fréquence, la perception humaine suit une progression logarithmique. Il est aisé de mettre ce principe en évidence par un exemple. L'octave physique, c'est-à-dire le rapport 2, est égale au *produit* d'une quinte par une quarte, ce qui s'écrit :

$$\frac{3}{2}\times\frac{4}{3}=\frac{12}{6}=2$$

Sur le plan perceptif, nous n'entendons pas un produit, mais une *somme*, c'est-à-dire :

$$5^{te}+4^{te}=8^{ve}$$

À une excitation croissant en progression géométrique, correspond donc, comme pour l'intensité, une sensation progressant arithmétiquement.

2.2. Les unités de mesure

L'unité de mesure des intervalles intuitivement utilisée par les musiciens est donc de nature logarithmique. Le ton, soit seul ou en combinaison (tierce, sixte…), soit fractionné (1/2 ton, 1/4 de ton) s'ajoute et se retranche.

Les unités de mesure des acousticiens obéissent au même principe, mais sont plus petites, très inférieures au ton, afin de pouvoir mesurer des micro-intervalles.

2.2.1. Le savart

L'unité la plus utilisée en France jusqu'à ces dernières années était le **savart**, symbolisé σ (lettre grecque *sigma* minuscule). On pose par convention :

$$10^3 \log 2 = 301\ \sigma$$

En d'autres termes, on part du logarithme du rapport d'octave, soit 2, que l'on multiplie par 1000 (10^3) pour obtenir une unité maniable (sinon 1 σ vaudrait presque un tiers d'octave, ce qui serait beaucoup trop grand).

L'octave comprenant 12 demi-tons, nous en déduisons la valeur d'un demi-ton :

$$301 \div 12 \approx 25\ \sigma$$

et celle d'un ton :

$$301 \div 6 \approx 50\ \sigma$$

Le signe ≈ peut surprendre par son manque de rigueur. N'oublions pas cependant que nous mesurons des intervalles perçus, et que toute précision supérieure à ce que l'oreille peut entendre ne présente pas un grand intérêt pour la psychoacoustique. C'est pourquoi, dans la plupart des calculs, il est fréquent d'utiliser la valeur de 300 σ arrondie pour l'octave (au lieu de 301), l'erreur entraînée par une telle approximation étant généralement insignifiante. Mais toutes les fois que la précision s'avère nécessaire, rien n'empêche de rétablir les décimales aux résultats.

Le savart présente deux avantages. D'abord de correspondre approximativement au plus petit intervalle que l'oreille peut percevoir dans les meilleures conditions ; ensuite d'exprimer directement le résultat I_σ à partir d'un rapport de fréquences quelconque, par la formule générale :

$$I_\sigma = 10^3 \log \frac{N_2}{N_1}$$

2.2.2. Le cent

Malgré ses qualités, le savart n'est pratiquement plus utilisé aujourd'hui, détrôné par une unité anglo-saxonne, le ***cent*** : on pose par convention que le demi-ton tempéré vaut 100 cents, ce qui en représente 1200 pour l'octave. Cela s'écrit :

$$\sqrt[1200]{2} = 2^{\frac{1}{1200}} = 1{,}0005777895$$

Ce nombre est celui par lequel il faut multiplier une fréquence pour l'élever d'un cent…

Dans ce système, un ton tempéré vaut 200 cents, de sorte que cette unité est évidemment très petite, et peut-être trop, puisque cela ne correspond plus à aucune possibilité perceptive. À titre comparatif, un savart est égal à 3,986 cents.

Voici une formule permettant de calculer un intervalle I_c en cents :

$$I_c = \frac{1200 \log {N_2}/{N_1}}{\log 2} \qquad (47)$$

2.3. Application numérique

1) Quelle est la valeur, exprimée en savarts et en cents, de la tierce majeure naturelle ?

Le rapport de tierce majeure naturelle étant 5/4, nous posons :

$$\frac{5}{4} = 1,25\ \sigma$$

$$\log 1,25 = 0,097 \times 10^3 = 97\ \sigma$$

$$\frac{1200 \log 1,25}{\log 2} = 386 \text{ cents}$$

Nous constatons au passage que la tierce majeure naturelle est plus petite de 14 cents (environ 3 σ) que la tierce majeure du tempérament égal qui en vaut 400.

2) À quelle note de musique correspond la fréquence 262 Hz ?
Nous savons que le *la3* est fixé à 440 Hz. Nous écrivons par conséquent :

$$\frac{1200 \log {}^{440}\!/_{262}}{\log 2}$$

La valeur obtenue est l'intervalle situé entre le *la3* et la note cherchée ; 898 cents représentent 9 demi-tons sous le *la3*, c'est-à-dire la note $\boxed{do_3}$.

Connaissant une fréquence, il peut être utile de savoir quelle nouvelle fréquence on obtient à partir d'un intervalle exprimé en cents. Par exemple, soit 440 Hz : quelle est la valeur de cette fréquence un quart de ton au-dessus ? L'intervalle cherché représente 50 cents. Il existe une formule permettant ce calcul :

$$N_{Hz} + n_{cents} = N_{Hz} \times 10^{\frac{n_{cents}}{1200} \times \log 2} \tag{48}$$

d'où : $$440 \text{ Hz} + 50 \text{ cents} = 440^{\frac{50}{1200} \times 0,301} = 453 \text{ Hz}$$

Pour les nostalgiques du savart, la formule à utiliser serait :

$$N_{Hz} + n_{\sigma} = N_{Hz} \times 10^{\frac{n_{\sigma}}{10^3}} \tag{49}$$

3. Hauteur et tonie

La sensation de hauteur ne suit pas une loi simple que la fréquence décrirait complètement. Comme pour l'intensité, il existe des différences entre ce qui est mesuré et ce qui est perçu. Nous distinguerons donc entre la hauteur physique, la fréquence exprimée en hertz, et la **tonie** ou hauteur subjective, qui peut éventuellement être exprimée en cents (ou en savarts), c'est-à-dire par la mesure de l'écart existant entre réalité et sensation.

3.1. Élaboration de la sensation de hauteur

Indépendamment de l'aspect physiologique qui ne nous concerne pas ici, la question est de comprendre comment s'élabore pour l'homme l'impression de hauteur, ou plus exactement, ce qui, dans un son, détermine sa hauteur.

3.1.1. Hauteur tonale

Il est évident que dans le cas d'un son sinusoïdal, qui ne comprend par définition qu'un seul composant (fig. 64 a), c'est directement sa fréquence qui détermine la sensation.

Mais pour de tels sons, presque toujours artificiels, la précision de l'oreille est nettement moins bonne qu'avec des sons riches en harmoniques. En effet, un musicien effectuant une dictée musicale composée seulement de sons purs voit ses performances sensiblement s'altérer, et commet des erreurs inhabituelles pour lui ; cela est net avec les grands intervalles qui sont alors plus difficiles à reconnaître.

3.1.2. Hauteur spectrale

Sauf pour quelques rares instruments, ou certains jeux d'orgue, les sons musicaux sont des spectres possédant plusieurs composants.

Dans un spectre harmonique, ce n'est pas le fondamental que l'on entend, mais la fréquence existant entre deux harmoniques de rangs consécutifs, et qui se trouve être précisément celle du fondamental (cf. la loi de Fourier).

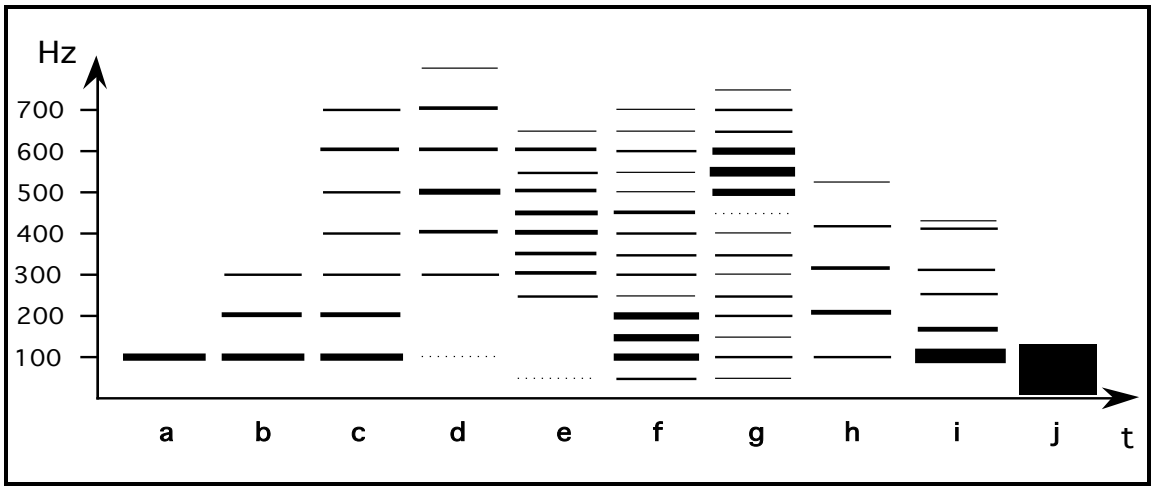


Fig. 64 : la sensation de hauteur

Ce fondamental peut être absent, il peut manquer plusieurs composants (fig. 64 d), la hauteur perçue, résiduelle en quelque sorte, reste la même.

Ceci explique que l'on puisse entendre des sons graves diffusés par de petits haut-parleurs ou des écouteurs qui amputent les spectres et sont incapables de rayonner à distance de véritables basses fréquences : l'oreille reconstitue ce qui n'existe pas.

Pour les sons non périodiques, si l'inharmonicité spectrale est faible (fig. 64 h), comme pour le piano, par exemple, l'oreille réagit comme si le spectre était harmonique : la différence existant entre un partiel et la fréquence théorique de l'harmonique correspondant est négligée.

Si au contraire l'inharmonicité est forte (fig. 64 i), nous percevons la ou les fréquences des partiels les plus intenses. Tout dépend du degré d'inharmonicité, et pour de tels sons, il est difficile d'établir des règles générales. Il existe une infinité de possibilités entre ces deux extrêmes. Le cas limite est représenté par le spectre de bruit (fig. 64 j) qui ne donne pas une sensation de hauteur à proprement parler, mais plutôt de registre. Chocs de « hauteurs » différentes, bruits de souffle tels *chhh* plus grave que *sss*.

3.1.3. Hauteur formantique

Jusqu'à une époque récente, la théorie de la hauteur spectrale fut la seule à rendre compte de la perception de ce paramètre. Mais l'apparition des ordinateurs et de la synthèse sonore a permis une importante avancée en ce domaine.

Une expérience simple permet de comprendre ce qu'est la hauteur formantique. Les sons f et g de la figure 64, rigoureusement de même fréquence puisque l'écart entre leurs harmoniques respectifs est identique, sont émis alternativement plusieurs fois. Nous devrions donc entendre des sons de même hauteur, mais de timbre différent, leurs formants ne se situant pas au même endroit. Or, à l'audition, il se produit une légère sensation d'intervalle entre les deux sons, g paraissant plus aigu que f.

Notre oreille est très sensible à la répartition de l'énergie dans un spectre, ce qui provoque une distorsion de la sensation de hauteur, laquelle, sans remettre en cause la loi de la hauteur spectrale,

est loin d'être négligeable. Nous dirons que les sons f et g sont de même fréquence, mais de **tonie** différente.

Les sons b, c et d sont de même fréquence mais la distribution de leur énergie spectrale est différente : leur tonie est croissante de l'un à l'autre. Le cas de e est encore plus intéressant : il est à l'octave inférieure de b, mais son énergie se situe tout entière dans l'aigu : il se produit alors une ambiguïté de hauteur entre les deux sons, l'oreille hésitant à désigner le plus grave ou le plus aigu des deux.

La hauteur formantique est systématiquement étudiée à l'heure actuelle avec les moyens modernes cités plus haut[1]. Les chercheurs ont fabriqué des sons « inouïs » au sens étymologique du terme, mettant en évidence des propriétés encore inconnues de notre perception. C'est ainsi qu'il existe maintenant des *sons paradoxaux*, véritables illusions sonores, qui montent dans l'aigu tout en devenant plus graves, descendent dans le grave tout en restant à la même hauteur, et bien d'autres encore… J.-C. Risset a créé de tels sons et les a intégrés dans plusieurs de ses compositions[2].

Cette particularité de notre système auditif est très importante, et entraîne des conséquences sur la pratique musicale encore mal comprises jusqu'ici (cf. infra).

Nous distinguerons désormais entre hauteur physique, ou *stricte*, et hauteur subjective, ou *tonie* ; un intervalle strict correspond à un rapport de la série harmonique, il est *juste* s'il est subjectivement perçu comme tel. Le rapport de quinte stricte 3/2 est généralement accepté comme juste, la septième mineure 7/4 est stricte, mais rejetée comme fausse par les musiciens formés au tempérament égal.

4. Interférence des paramètres

Les quatre paramètres définissant un son, hauteur, durée, intensité et timbre, peuvent interférer entre eux, agir les uns sur les autres par interaction, provoquant des distorsions de la perception. Les sons paradoxaux que nous venons d'évoquer en sont un exemple, où une modification de la composition spectrale, donc du timbre, entraîne une variation de la sensation de hauteur. Il existe d'autres phénomènes d'interférences, que nous allons étudier à présent.

4.1. Hauteur et registre

L'oreille n'a pas le même comportement — ni d'ailleurs les mêmes performances — dans le grave ou l'aigu de l'aire audible, et le diagramme de Fletcher avait déjà montré la non linéarité du système auditif dans l'interférence hauteur/intensité. Il s'agit maintenant de l'appréciation des intervalles en fonction de la hauteur.

4.1.1. Distorsion de la sensation d'intervalle

Des intervalles égaux ne sont pas toujours perçus identiquement : cela dépend du registre où ils se trouvent. D'une façon générale, un intervalle juste dans le médium paraît trop court dans l'aigu, et trop long dans le grave.

Cette distorsion est particulièrement bien mise en évidence avec les octaves : les rapports stricts 2000/4000 Hz, 3000/6000 Hz, et a fortiori des fréquences plus élevées, « tirent » vers la septième. À l'inverse, des graves comme 80/160 Hz ou 100/200 Hz passent presque pour des octaves augmentées, en tout cas trop longues ; mais dans le registre médium, 400/800 ou 800/1600 Hz sonnent juste à l'oreille.

Ce phénomène pèse fortement sur toute la problématique de la justesse, et concrètement sur l'accordage des instruments à grande étendue, comme l'orgue ou le piano (cf. infra).

[1] Cf. en particulier J.-C. Risset, «Paradoxes de hauteur», *Rapports IRCAM,* Paris, 1978.

[2] Par exemple *Inharmonique*, pour voix et bande magnétique (1977).

4.1.2. L'échelle des mels

Le mel (abréviation de *melody*), inventé par l'acousticien américain Stevens, est l'unité de tonie destinée à mesurer l'écart entre la justesse physique, c'est-à-dire celle des rapports stricts, et la réalité perceptive.

On pose par convention que 1000 mels correspond à 1000 Hz, et que l'octave de 1000 mels est 2000 mels. L'octave juste de 1000 Hz valant environ 2100 Hz, on montre qu'à 2000 Hz correspondent 1800 mels, et ainsi de suite.

Mais la tonie variant beaucoup avec les individus, l'échelle des mels n'a guère d'utilité pratique. Elle a en outre été établie au moyen de sons sinusoïdaux, ce qui l'éloigne de la réalité musicale.

4.2. Hauteur et intensité : le diagramme de Stevens

La tonie varie avec l'intensité. Ce phénomène est particulièrement net avec les sons sinusoïdaux, mais pas seulement, comme nous le verrons plus loin.

Stevens a étudié quantitativement cette variation dont les résultats sont portés sur un diagramme (fig. 65). Lorsque l'intensité, figurant en abscisse, augmente, les graves semblent baisser, les médiums, entre 800 et 3000 Hz, restent à peu près stables, et les aigus semblent monter ; en ordonnée figure le pourcentage de déviation subjective. Il est facilement obtenu par comparaison, en demandant au sujet d'égaliser en hauteur deux sons, l'un fort, l'autre faible. Le pourcentage de différence de fréquence constatée peut aussi être exprimé en cents ou en savarts.

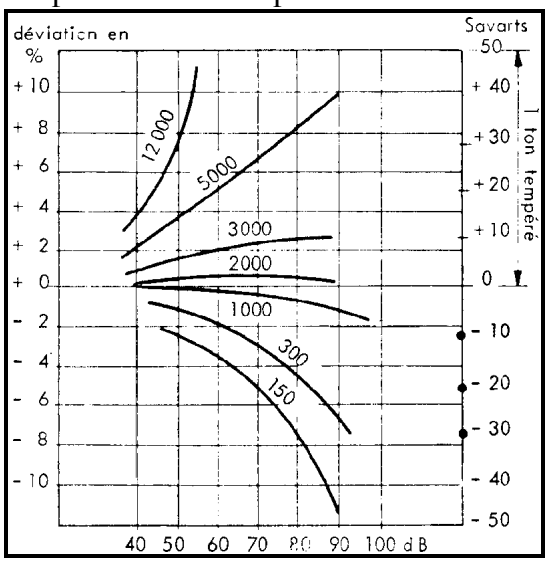


Fig. 65 : le diagramme de Stevens

Une déviation de hauteur de 6 % est obtenue facilement, et cela représente déjà un demi-ton. En effet, la fréquence 4000 Hz à faible intensité, par exemple, sonne subjectivement à la hauteur 4240 Hz à 90 dB. D'où :

$$\frac{1200 \log {}^{4240}\!/_{4000}}{\log 2} = 101 \text{ cents}$$

Il est possible de vérifier cette sensation en approchant progressivement un diapason vibrant près de son oreille : le son semble baisser, mais très légèrement, d'une part parce que la variation d'intensité est faible, d'autre part parce que 440 Hz est une fréquence moyenne et que sa tonie est peu sensible aux changements de niveau.

L'effet est globalement moins net avec les sons complexes, mais leurs composants sont néanmoins sinusoïdaux et sensibles individuellement aux variations d'intensité ; comme le spectre comporte généralement à la fois des basses et des hautes fréquences, la déviation opère

simultanément dans les deux sens, créant une dissonance dans le timbre du son joué très fort. Un son harmonique peut ainsi donner l'impression de se désaccorder à forte intensité.

4.3. Hauteur et durée

L'influence du temps sur la tonie est encore mal connue. Des hypothèses ont été émises sur un éventuel rapport entre un temps psychologique, susceptible de varier dans son appréciation, et la hauteur, fonction du temps physique, astronomique, pourrait-on dire.

La « seconde psychologique » qui s'allonge sous l'effet de l'ennui ou rétrécit avec l'excitation aurait-elle une incidence sur la fréquence d'un son, dans le sens qu'elle contiendrait un plus ou moins grand nombre de périodes ? Cela paraît fantaisiste.

Un tout autre domaine de recherche est celui des différents temps d'intégration des sons au sein du système auditif, qu'on appelle les *constantes de temps*.

L'oreille comporte une partie mécanique, l'appareil de transmission, qui n'échappe pas aux lois de l'inertie et demande un certain délai pour répondre aux stimulations. Ce temps, de l'ordre de quelques millisecondes, varie avec de nombreux facteurs, comme l'intensité, le timbre ou la fréquence.

D'autres constantes de temps, nettement plus longues, plusieurs dizaines de millisecondes, concernent la durée nécessaire à la reconnaissance d'une hauteur ou d'un timbre. Les travaux sont en cours en ce domaine, et les résultats encore peu nombreux et souvent contradictoires.

4.4. Le vibrato

Un son est rarement d'une stabilité rigoureuse, et particulièrement en musique avec la pratique du vibrato, qui se définit comme une fluctuation systématique de la hauteur et/ou de l'intensité.

4.4.1. Données psychophysiologiques

Un vibrato est caractérisé par deux paramètres : sa **vitesse**, c'est-à-dire le nombre de fluctuations par seconde, et sa **profondeur de modulation**, à savoir l'intervalle balayé par la fluctuation.

Si la fluctuation est lente, jusqu'à 5 par seconde, l'oreille entend une *ondulation* dont elle peut facilement suivre le contour ; si la vitesse du vibrato est rapide, plus de 10 Hz, on perçoit une succession de notes voisines, un *trémolo* ou un *chevrotement* ; mais entre ces deux valeurs, pour un vibrato compris entre 6 et 10 fluctuations par seconde, l'oreille ne perçoit plus de variations de hauteur, mais seulement d'intensité, au rythme du vibrato.

Ce phénomène caractéristique est appelé **cadence de fusion**. Musicalement, le vibrato n'existe qu'à cette cadence, et est jugé incorrect ou désagréable en dehors de ces limites. Les valeurs reconnues généralement les plus satisfaisantes sont 6 ou 7 Hz. Mais cela dépend évidemment de plusieurs facteurs, principalement du timbre (type d'instrument), du registre, mais aussi du style de musique…

La profondeur de modulation varie surtout selon le type d'instrument : très petite pour la flûte traversière, elle atteint un demi-ton et plus chez certains sopranos. A la cadence de fusion, la tonie du son correspond prend une valeur moyenne comprise dans l'aire de balayage du vibrato. Mais la hauteur est d'autant plus difficile à identifier avec précision que la profondeur de modulation est importante.

La sonie d'un son avec vibrato est plus grande que celle d'un son droit (c'est-à-dire sans vibrato) d'intensité physique égale. L'explication réside certainement dans le fonctionnement de la cochlée et dans la transmission du signal par le nerf auditif. Une fluctuation de fréquence excite deux points très rapprochés de la membrane basilaire ; à la cadence de fusion, les deux points se combinent et mettent en jeu un nombre accru de cellules de Corti pour la traduction d'une seule hauteur. Un phénomène analogue se produit dans le nerf auditif avec le recrutement des fibres nerveuses.

4.4.2. Aspects musicaux

Le vibrato, à l'origine simple ornement, a conquis dans la musique occidentale une importance considérable depuis le XIX^{e} siècle. Il agrémente l'émission de toutes les notes de la plupart des instruments.

Les raisons d'un tel développement ne sont pas élucidées, mais ses propriétés psychoacoustiques suffisent à le justifier : il permet, comme nous l'avons vu, de gagner en niveau d'intensité subjective sans dépense d'énergie supplémentaire.

Mais surtout, de par sa nature fluctuante, il apporte à l'auditeur un élément de variété, et augmente la quantité d'information contenue dans un son. On comprend du même coup pourquoi le vibrato d'un instrument électronique ne peut remplir cette fonction : son absolue régularité le rend par là même totalement prévisible, c'est-à-dire non informatif. À l'inverse, un vibrato fortement irrégulier ou déréglé, donc très riche en information, peut gêner l'auditeur en retenant par trop son attention.

4.5. Hauteur et timbre

Nous avons déjà étudié, avec la hauteur formantique, comment les composantes du timbre pouvaient agir sur la sensation de hauteur. Les sons paradoxaux en ont fourni un bon exemple. Il s'agit maintenant d'observer quelques conséquences de cette interférence sur la pratique musicale.

L'éloignement modifie le timbre : les harmoniques aigus d'un spectre sont plus fortement absorbés que les graves, et cela peut entraîner par contrecoup un abaissement de la tonie. De tels phénomènes existent dans les théâtres, quand des choristes ou des instrumentistes jouent dans les coulisses ou derrière la scène pour créer un effet de distance : les problèmes de justesse sont alors épineux…

L'effet d'absorption des aigus (avec ses conséquences sur la justesse) se produit également avec les chœurs à bouches fermées, ou avec certains décors peu réfléchissants comme les rideaux, les tentures, etc.

CHAPITRE XIV

LA SENSATION D'INTERVALLE

1. Intervalles mélodiques

1.1. Seuil de perception différentiel des intervalles

L'oreille est capable de discerner de très petits intervalles, mais ses performances dépendent essentiellement de la fréquence. Dans les meilleures conditions, c'est-à-dire à des intensités moyennes, et dans une bande de fréquence comprise entre 500 et 2000 Hz, sa précision est supérieure à 3/1000^{e}. Cela signifie qu'une personne entraînée entend distinctement un intervalle de rapport 1003/1000 ou 2006/2000 Hz, ce qui correspond à un peu plus de 1 savart, ou à 5 cents. Ces performances peuvent encore s'améliorer avec la pratique.

Toutefois la précision décroît dès que l'on s'écarte de la zone sensible, aussi bien vers les graves que vers les aigus : elle est de 5/1000^{e} à 100 Hz et à 7000 Hz, et tombe à 10/1000^{e} à 50 Hz et à 10 000 Hz, soit 4,3 σ ou 17 cents.

1.2. Altération de la perception des intervalles

Les intervalles mélodiques sont sujets à des distorsions de perception particulières qui dépendent du contexte musical. D'autre part, l'appréciation de la justesse d'un intervalle est fonction de la mémoire et de l'acquis culturel.

1.2.1. L'attraction

L'attraction donne la sensation qu'une note est attirée par une autre, par exemple la sensible vers la tonique. Elle n'existe qu'en cas d'inégalité hiérarchique entre les degrés d'une échelle (par exemple la sensible vers la tonique dans le système tonal).

Cette impression, totalement culturelle, ne doit rien à une quelconque attirance physique ou prétendument naturelle. Il existe en effet dans d'autres cultures des échelles semblables à notre gamme majeure où le 7^{e} degré n'est pas considéré comme sensible et ne monte pas vers la tonique.

En cas d'attraction, l'oreille devient très peu exigeante sur la précision de l'intervalle concerné. Dans des situations musicales réelles, des demi-tons de sensibles peuvent rétrécir jusqu'à 80, 70, et même 60 cents sans que l'auditeur en soit conscient. Une musique jouée de cette façon paraîtra « tendue » mais certainement pas fausse. Les instruments dont les hauteurs ne sont pas fixées utilisent — plus ou moins volontairement — cette possibilité à des fins expressives en rapport avec le contexte musical.

1.2.2. La tolérance

La tolérance est l'accord de l'oreille sur une note perçue comme étrangère au système utilisé, c'est-à-dire la faculté de pouvoir substituer mentalement une note juste à une note fausse ; c'est une activité consciente, du moins dans un premier temps, avant qu'un automatisme n'en prenne éventuellement le relais.

La tolérance est aussi importante que l'attraction. Au-delà de son aspect anecdotique, comme de prendre malgré tout du plaisir à jouer sur un piano dont l'accord laisse quelque peu à désirer, elle abandonne une certaine marge d'erreur aux interprètes qui, heureusement, n'ont pas la précision des générateurs électroniques. Certaines limites ne doivent cependant pas être dépassées, comme chacun peut le constater.

La tolérance a joué historiquement un rôle considérable, aux époques de changement de tempérament, cela particulièrement du XVI^e^ au XIX^e^ siècle[1]. À lire les écrits des musiciens sur ce sujet, on observe que nos prédécesseurs avaient l'ouïe extrêmement fine en matière d'intervalles, et qu'il leur fallait beaucoup d'efforts pour s'habituer à un nouveau système.

1.2.3. L'équivoque

L'équivoque apparaît quand la tolérance ne joue plus. Lorsqu'une note est trop éloignée de sa hauteur normale, on ne peut lui substituer sa valeur d'origine. C'est le cas des fausses notes, du doigt qui accroche la touche voisine, mais là n'est pas l'essentiel.

Il existe des intervalles qui nous paraissent faux, complètement étrangers à notre système musical : c'est le cas, par exemple, de la *tierce neutre*, exact milieu de la quinte. Pour une oreille occidentale, cet intervalle est difficile à entendre et à chanter, car nous ne l'avons pas en mémoire ; selon l'humeur ou le contexte, il sera perçu comme tierce majeure trop basse ou tierce mineure trop haute. Pourtant la tierce neutre existe dans d'autres cultures, et ne pose pas de problèmes particuliers d'intonation aux musiciens arabes, iraniens ou turcs qui la pratiquent dans plusieurs de leurs modes.

C'est pour cette raison qu'un effort est parfois nécessaire, au moins dans un premier temps, pour ne pas trouver faux, par exemple, les tons issus de la division de l'octave en 5 ou 7 parties égales qu'utilise la musique savante du Sud-Est asiatique. Il est clair qu'entendre faux de tels intervalles, c'est plaquer un système inadéquat, en l'occurrence notre tempérament égal, sur un autre, c'est utiliser une mauvaise grille d'analyse.

2. Intervalles harmoniques

La perception des sons simultanés met en évidence des problèmes spécifiques liés à des phénomènes de fusion et de combinaison, et ne se pose pas dans les mêmes termes que pour les sons successifs. Ainsi, grâce aux battements, la perception différentielle des intervalles harmoniques est-elle d'une extraordinaire précision.

2.1. Consonance et dissonance

Si les notions de consonances et de dissonances nous sont familières, il n'est pas pour autant aisé de les définir, même dans l'état actuel de nos connaissances.

2.1.1. Théorie de Helmholtz

Au milieu du XIX^e^ s., Helmholtz a proposé une explication de la consonance entre deux sons par l'évaluation du nombre des harmoniques communs à leurs spectres. Soit par exemple un intervalle d'octave :

600	600
500	
400	400
300	
200	200
100	

[1] Cf. chapitre XV.

Tous les harmoniques du son de 200 Hz ont un équivalent dans celui de 100 Hz : le taux de consonance est de 100 %. Avec un rapport de quinte :

un harmonique sur deux du son le plus aigu est commun avec ceux du plus grave : le taux de consonance de la quinte est de 50 %.

600	600
500	
	450
400	
300	300
200	
	150
100	

Helmholtz montrait de façon analogue que la quarte est consonante à 33 %, et que la tierce majeure, dont les spectres ont en commun un harmonique sur quatre, l'est à 25 %. Il est logique que l'impression de consonance ou de dissonance soit plus prononcée pour les intervalles harmoniques que pour les sons successifs, par suite de l'effet de fusion qui découle des composants communs.

2.1.2. Données actuelles

Un certain nombre d'arguments s'opposent pourtant à la théorie de la consonance de Helmholtz. Tout d'abord, deux sons sinusoïdaux dans des rapports de quinte, de quarte ou de tierce sont consonants et n'ont cependant par définition aucun harmonique commun. Il est possible toutefois que le système auditif crée des harmoniques[1], et qu'un son pur y subisse une distorsion qui l'enrichit.

D'autre part, aucun des intervalles utilisés dans le tempérament égal, à l'exception de l'octave, ne correspond à un rapport harmonique simple, c'est-à-dire qu'aucun n'est strict. Dans ce cas, les intervalles n'ont pas d'harmoniques communs, ce qui n'empêche pas certains d'entre eux d'être perçus comme consonants.

Un dernier argument, enfin, tend à relativiser cette théorie séduisante mais tout de même assez rigide, en ce qu'elle prétend expliquer entièrement un phénomène subjectif par des données mathématiques. Les intervalles n'ont pas toujours provoqué les mêmes sensations à toutes les époques. S'il est vrai qu'au Moyen Âge seuls étaient considérés comme consonants les rapports d'unisson, d'octave, de quinte et de quarte, qui peut affirmer aujourd'hui que la tierce majeure est deux fois plus dissonante que la quinte ? Comment ne pas considérer ces notions comme relatives et évolutives ? L'histoire de l'harmonie est là pour répondre.

La théorie de la consonance de Helmholtz n'est certainement pas sans fondement, mais doit être ré-interprétée à la lumière de l'expérience musicale historique, et complétée par des expériences nouvelles en liaison avec la psychoacoustique moderne.

2.2. Les sons subjectifs

Les sons subjectifs sont créés par le système auditif dans certaines conditions et sont liés à la perception de la hauteur spectrale, que nous avons déjà analysée. Ils apparaissent à la fois par différences et par sommes de leurs composants.

2.2.1. Sons soustractifs

Lorsque deux sons purs — ou presque purs — sont superposés, il est possible d'entendre distinctement un troisième son, dont la fréquence est égale à la différence des deux premiers. Par

[1] Cf. chap. VIII § 2.3.

exemple, en superposant les fréquences 1200 Hz et 1600 Hz, on entend 400 Hz : ce son, appelé **soustractif** parce qu'obtenu par différence, est subjectif, reconstitué par le système auditif.

L'oreille traite en fait les deux sons en combinaison comme deux harmoniques consécutifs de rangs 3 et 4 d'un son de 400 Hz dont elle restitue le fondamental. Il est possible de le vérifier en intercalant entre les deux premiers sons un troisième, de fréquence 1400 Hz : le fondamental octavie alors vers le grave et passe à 200 Hz, les trois fréquences génératrices représentant cette fois les harmoniques 6, 7 et 8 du fondamental subjectif.

Les rapports de fréquence entre les sons de combinaison ne semblent toutefois pas déterminants. L'expérience montre que si l'on superpose les fréquences 1500 et 1700 Hz, on peut obtenir un son soustractif de 200 Hz, alors même que les deux composants ne sont pas des multiples entiers de rangs consécutifs de la fréquence résultante. Le son soustractif est dans ce cas moins intense, mais peut tout de même être clairement entendu, précisément dans la mesure où il fusionne moins avec les deux fréquences génératrices que s'il apparaissait comme composant harmonique.

Les sons soustractifs sont surtout perceptibles avec des sinusoïdes ou des spectres pauvres en harmoniques, mais en réalité le phénomène existe presque toujours, car les composants des sons riches se combinent entre eux.

Les musiciens ont constaté depuis longtemps l'existence des sons différentiels. Le violoniste italien Giuseppe Tartini et l'organiste allemand Georg Andreas Sorge au XVIII^{e} siècle sont parmi les premiers à s'y être intéressés. Les facteurs d'orgue utilisent les différentiels dans certains jeux pour éviter l'emploi de tuyaux de trop grande taille qui sont en outre très coûteux. Le son grave est alors réalisé au moyen de tuyaux plus petits, accordés sur ses harmoniques 2 et 3 ; le son résultant peut être renforcé par l'adjonction de tuyaux encore plus petits donnant les harmoniques aigus, comme dans les fournitures. Mais le timbre n'a évidemment pas la plénitude ni la consistance dans le grave d'un véritable 32 pieds.

2.2.2. Sons additionnels

En même temps que les sons soustractifs, il existe des sons additionnels de fréquence N_A tels que $N_A = N_1 + N_2$. Les conditions de leur apparition sont les mêmes que pour les sons différentiels, mais leur présence est surtout théorique, car ils sont pratiquement inaudibles, peut-être pour des raisons physiologiques, l'oreille étant moins sensible à ce phénomène.

3. Justesse et accordage

3.1. Qu'est-ce que jouer juste ?

Les divergences constatées entre hauteur physique et hauteur subjective prennent toute leur valeur avec le problème de la justesse musicale.

Une polémique éclata au début du siècle parmi les professeurs d'instruments à archet du Conservatoire de Paris, les uns prônant la « justesse expressive », c'est-à-dire l'adaptation des intervalles aux nécessités du contexte musical, les autres le strict respect du tempérament égal, seule référence valable à leurs oreilles. Un tel débat est aujourd'hui dépassé, et le point de vue des premiers s'est heureusement imposé.

Un interprète, même s'il le veut (ou le croit), ne peut reproduire exactement les hauteurs écrites sur une partition sans une marge de tolérance. Une étude menée aux États-Unis, voici quelques dizaines d'années, a montré que des chanteurs professionnels de haut niveau n'atteignent jamais la hauteur théorique pour 1/4 des notes, et que pour les 3/4 restants elle n'est réalisée que pour de courts instants[1]. Des analyses statistiques plus récentes, toujours effectuées à partir de prestations de grands chanteurs, ont chiffré à ± 15 cents l'erreur de hauteur dans le cas de chant accompagné, et à près de 60 cents pour un intervalle de quinte sans accompagnement ; les écarts s'accentuent encore avec les fluctuations de l'intensité, ainsi que pour les notes très brèves.

[1] C. Seashore, «Forms of artistic pitch deviations in singing», *Psychological Bulletin*, Princeton, 677, 1934.

La situation est la même pour la musique instrumentale, mais tous les instruments n'ont pas le même statut, et il existe d'importantes variations d'une famille à l'autre. Les différences relevées sont généralement moins importantes que pour la voix, sauf en cas d'attraction ou d'intentions expressives accentuées.

L'usage du vibrato, plus ou moins profond, vient encore éloigner la justesse musicale de la hauteur théorique. Mais la tolérance de l'oreille intervient tant que ces fluctuations ne dépassent pas des limites qui varient elles-mêmes avec plusieurs facteurs, et en premier lieu avec chaque individu. D'autre part, il est prouvé expérimentalement qu'une exécution musicale avec des valeurs acoustiquement exactes n'apporte pas systématiquement de satisfaction supplémentaire aux auditeurs. On ne voit d'ailleurs pas quelle fonction du système auditif présenterait une telle exigence.

3.2. Problèmes d'accordage

Indépendamment des impératifs de justesse au cours de l'exécution musicale, l'accord même de certains instruments pose problème, tant pour des questions de facture qu'à cause des techniques utilisées.

3.2.1. Instruments à cordes

D'une façon générale, les cordes sont rarement au tempérament égal, étant accordées par suppression des battements sur les quintes, c'est-à-dire au rapport 3/2 strict : d'où leur réputation bien établie, et maintes fois vérifiée[1], de jouer selon la justesse pythagoricienne (cf. chap. XV).

La justesse des cordes frottées dépend aussi de la pression, plus ou moins importante, exercée par l'archet : l'écart peut dépasser 1,5 %. L'action des doigts qui pincent et tirent les cordes augmente leur tension, donc leur fréquence. Un sonagramme de harpe, par exemple, montre clairement une déviation de hauteur au moment de l'attaque.

3.2.2. Le cas du piano

La présence simultanée, avec le piano, de registres très grave et très aigu entraîne des complications liées à la distorsion de la sensation d'intervalle dans les extrêmes du spectre. Si, dans ces zones, l'accord respectait les valeurs théoriques du tempérament égal, les notes aiguës paraîtraient trop basses, et les notes graves trop hautes (cf. chap. XIII § 4.1.1).

Les cordes d'un piano à queue sont plus longues, et rayonnent plus d'énergie dans le grave, à fréquence égale, que celles d'un piano droit : pour que leur tonie soit la même, ces deux instruments ne doivent pas être accordés à la même fréquence sur toute leur étendue.

En ne réglant pas rigoureusement à la même hauteur les cordes doubles ou triples d'une note médium ou aiguë, les accordeurs introduisent un battement très lent, à peine perceptible, dont l'intérêt est de faire « vivre » cette note[2].

L'accord d'un piano n'est donc pas une chose aisée, et la subjectivité, les « recettes » personnelles, l'expérience, y tiennent une grande part. C'est ce qui explique l'échec de l'accordeur électronique, qui fournit des fréquences calculées théoriquement, sans tenir compte des impondérables de la tonie. Une telle réalisation ne saurait satisfaire à l'exigence d'un musicien raffiné.

3.2.3. Instruments à vent

Au contraire des cordes qui baissent lorsqu'elles se détendent, les instruments à vent ont tendance à monter quand la température de l'air augmente, ce qui ne manque pas de se produire en cours de jeu.

---

[1] Cf. par exemple G. Van Esbroek et G. Monfort, *Qu'est-ce que jouer juste ?*, Bruxelles, 1946.

[2] G. Weinreich, «Comment vibrent les cordes d'un piano ?», *Sons et musique*, trad. fr. Paris, 1980.

Certains instruments, de par leur facture ou leur conception, ne sont pas rigoureusement justes sur toute leur étendue. La flûte traversière, par exemple, est légèrement trop basse dans le registre grave, et trop aiguë dans la troisième octave. Les bons musiciens corrigent — parfois sans s'en rendre compte — ces écarts par la position des lèvres sur l'embouchure. Les cuivres utilisent, quant à eux, la division de la colonne d'air pour produire les différents partiels, et ne peuvent du même coup sonner tout à fait juste dans le tempérament égal, relativement éloigné des valeurs naturelles fournies par le tuyau.

Loin de constituer un handicap pour la musique, la plupart de ces phénomènes contribuent à enrichir ou à mettre en valeur des timbres qui, sans cela, seraient peut-être moins bien perçus et perdraient de leur originalité en se fondant totalement dans l'ensemble orchestral.

CHAPITRE XV

LE TEMPERAMENT DES ECHELLES MUSICALES

1. Introduction

Réaliser un tempérament, c'est déterminer la valeur de tous les intervalles d'une échelle sonore en conférant à chaque degré une hauteur théorique. Cette opération est implicite ou explicite, mais toujours sous-jacente à la pratique musicale, aucune musique au monde n'utilisant la totalité des sons qu'elle peut produire ou dont elle dispose.

En Occident, la gamme diatonique comporte 7 degrés, 12 pour l'échelle chromatique, dans le cadre d'une octave. Dans presque tous les cas, l'opération du tempérament consiste à ajuster, à modifier la position de ces degrés pour la rapprocher le plus possible des valeurs naturelles, sans trop différencier des intervalles de même nom, et surtout sans jamais altérer l'octave.

Des choix sont donc effectués, qui peuvent influencer en retour le style musical, parfois conditionner l'évolution même du langage. Ceci est particulièrement vrai pour la musique européenne, dont les préoccupations en matière de tempérament représentent une large part de l'histoire théorique.

2. Le tempérament pythagoricien

2.1. Construction

De tous les tempéraments, le système pythagoricien est le plus ancien, et celui qui fut le plus longtemps en usage, de l'Antiquité grecque à la fin du Moyen Âge. Une telle longévité montre assez que ses qualités musicales étaient nombreuses, et son esprit est toujours présent dans la justesse de certains instruments à cordes (cf. chap. XIV).

2.1.1. Le cycle des quintes

En enchaînant à la suite 12 intervalles de quintes, on obtient les 12 notes de la gamme pythagoricienne. Il est d'usage de démarrer le cycle sur la note *fa* pour qu'apparaissent en premier les degrés sans altération, mais n'importe quelle note peut évidemment servir de point de départ :

fa do sol ré la mi si
fa# do# sol# ré# la# mi#

La première ligne fournit le genre diatonique, la seconde le genre chromatique, et en poussant au-delà du *mi#*, on obtiendrait le genre enharmonique de la théorie grecque. Les cinq premières quintes fournissent en outre les degrés de base du système pentatonique, largement utilisé dans les musiques ethniques, et étudié sur le plan théorique de manière approfondie par les Chinois.

2.1.2. Le comma pythagoricien

En partant de *fa*, on parvient après 12 quintes sur *mi#*, qui, enharmoniquement, devrait se confondre avec le point de départ. Or ce n'est pas le cas, ce *mi#* est légèrement plus haut, toutes octaves réduites, que le *fa*. Cela se montre aisément par le calcul. Additionner 12 quintes, c'est

multiplier 12 fois le rapport 3/2 par lui-même, en franchissant du même coup 7 octaves. Arithmétiquement, il est clair que :

$$\left(\frac{3}{2}\right)^{12} > 2^7$$

La différence entre *mi#* (3/212) et *fa* (27) a pour valeur :

$$\frac{1200 \log {}^{129,146}\!/_{128}}{\log 2} = 23,5 \text{ cents}$$

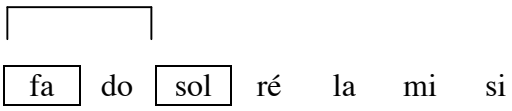
soit un **comma pythagoricien**, dont le rapport est égal à :

$$\frac{(3/2)^{12}}{2^7} = \frac{531441}{524288}$$

Le cycle ne se referme donc pas sur lui-même, de sorte qu'il serait plus juste de parler de « spirale des quintes », se poursuivant à l'infini. Ce point d'une grande importance est à l'origine, ainsi que nous le verrons, du développement des tempéraments à partir de la Renaissance.

2.2. Calcul des intervalles

Dans le système pythagoricien, tous les intervalles sans exception se calculent à partir du cycle des quintes. Le principe en est toujours le même : le nombre de quintes franchies pour parvenir à la note cherchée exprime son rapport, après réduction éventuelle des octaves. Par exemple, la seconde majeure :



L'intervalle *fa-sol* représente 2 quintes, soit :

$$\left(\frac{3}{2}\right)^2 = \frac{9}{4}$$

Comme une octave a été franchie, il faut abaisser le *sol* d'autant :

$$\frac{9}{4} \div 2 = \frac{9}{8}$$

C'est la valeur du ton pythagoricien. Quelles que soient les notes choisies, par exemple *do-ré* ou *sol-la*, le rapport a toujours la même valeur. Pour la 3ce majeure, nous obtenons :

$$\left(\frac{3}{2}\right)^4 = \frac{81}{16}$$

avec un franchissement de 2 octaves qu'il faut réduire :

$$\frac{81}{16} \div 2^2 = \frac{81}{64}$$

Cette tierce contient naturellement 2 tons pythagoriciens. En effet :

$$\left(\frac{9}{8}\right)^2 = \frac{81}{64}$$

Les demi-tons apparaissent de façon similaire, et non par division du ton. On peut vérifier que les demi-tons diatoniques et chromatiques ne sont pas égaux, puisqu'ils ne représentent pas le même nombre de quintes. Le demi-ton diatonique, ou *limma*, a pour rapport :

$$\left(\frac{3}{2}\right)^5 \div 2^3 = \frac{243}{256}$$

ou 256/243 pour le limma ascendant (*mi-fa*). Le demi-ton chromatique (*fa-fa#* par exemple), appelé *apotome*, vaut quant à lui :

$$\left(\frac{3}{2}\right)^7 \div 2^4 = \frac{2187}{2048}$$

Le calcul indique que le limma est plus petit que l'apotome, le premier valant 90 cents, et le second 114 cents : leur différence est d'un comma pythagoricien. Le ton, contenant les deux sortes de demi-tons, vaut donc 204 cents, et la tierce majeure le double, soit 408 cents.

2.3. Adaptation au clavier

Avec le développement des instruments à clavier à la fin du Moyen Âge, se pose le problème de la réalisation pratique du tempérament pythagoricien. Arnault de Zwolle, un théoricien du XV^e^ siècle, préconise une solution dans l'un de ses écrits[1] : puisqu'il est impossible d'accorder 12 quintes justes consécutivement sous peine de ne pas retrouver l'octave de la note de départ, 11 quintes seront justes et l'excédent (soit un comma pythagoricien) entièrement reporté sur la 12^e^, qui se trouve donc réduite d'autant. L'astuce consiste à commencer le cycle sur *solb* pour que la quinte fausse, appelée « quinte du loup », tombe sur l'intervalle *si-fa#*, ce dernier équivalant enharmoniquement à *solb* (fig. 66)[2] : le mode de *si* étant en effet inusité à cette époque, car le seul à ne pas donner diatoniquement la quinte de la tonique, il en résultait un inconvénient somme toute mineur.

La figure 66 montre que ce système comporte 8 tierces majeures pythagoriciennes (de *solb-sib* à *sol-si*), puisque produites par des quintes strictes ; les 4 tierces restantes, en réalité des quartes diminuées (*ré-solb* à *si-mib*), étant amputées de la valeur du comma pythagoricien, sont très proches de la valeur naturelle 5/4, précisément plus petites d'un comma schisma (cf. infra chap. XV § 2.4.2).

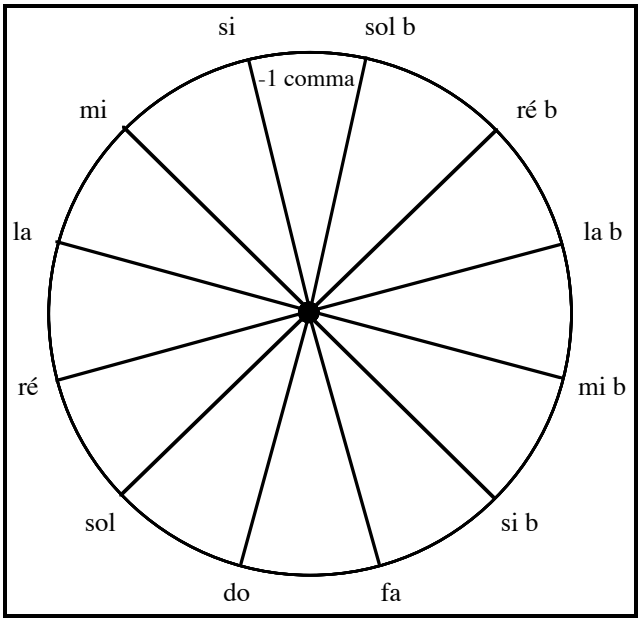


Fig. 66 : le système pythagoricien

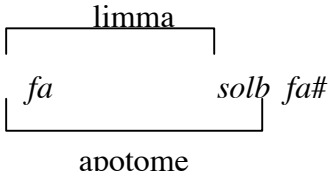
[1] Cf. F. Lesure, *Les traités d'Henri-Arnault de Zwolle et de divers anonymes*, Kassel, 1972.

[2] L'idée de représenter les systèmes d'accord par un cercle est due à P.-Y. Asselin (cf. Bibliographie).

2.4. Valeur musicale

2.4.1. Caractère mélodique

La valeur des différents intervalles d'un système induit et détermine des qualités musicales spécifiques. Dans le tempérament pythagoricien, les tons larges et le demi-ton diatonique plus petit que le demi-ton chromatique confèrent aux mouvements mélodiques une tension caractéristique, par attraction naturelle, car inscrite structurellement dans les intervalles. Le dièse est plus haut que le bémol :



2.4.2. Le problème de la tierce harmonique

Ce tempérament convient parfaitement à l'expression mélodique, notamment à celle du Moyen Âge, dont il respecte le caractère tendu et attractif. Cependant, la tierce majeure n'est pas stricte et présente des battements lorsqu'elle est utilisée harmoniquement. Calculons la différence entre les tierces majeures pythagoricienne (P) et naturelle (N) :

P : do sol ré la mi$^{(+)}$ $\left(\frac{3}{2}\right)^4 = \frac{81}{64}$

N : do do do mi $2^2 \times \frac{5}{4} = \frac{81}{64}$

L'intervalle entre les deux *mi* est de :

$$\frac{81}{16} \div \frac{80}{16} = \frac{81}{80}$$

et vaut en cents :

$$\frac{1200 \log {}^{81}\!/_{80}}{\log 2} = 21{,}5 \text{ cents}$$

Cette valeur est appelée **comma syntonique** (ou comma majeur). La différence entre le comma pythagoricien et le comma syntonique, très petite (2 cents), se nomme **comma schisma**.

Il est probable que le caractère dissonant dû aux battements de la tierce pythagoricienne ait été un obstacle à son assimilation comme consonance parfaite : chez Josquin des Prés, au début du XVI^{e} siècle, encore 50 % environ des cadences finales ne comportent pas de tierce. En fait, cet intervalle n'a jamais été véritablement toléré, et les musiciens de la Renaissance, stimulés par les progrès de l'harmonie et l'affirmation de la tonalité naissante, plutôt qu'accepter ces battements dans leurs accords parfaits, ont préféré bouleverser leurs habitudes, et changer de tempérament.

3. Les tempéraments à intonations pures

Le seul grief sérieux retenu contre le tempérament pythagoricien est finalement sa tierce majeure peu convenable à l'harmonie. C'est pourquoi les théoriciens de la Renaissance, et au premier rang d'entre eux l'Italien Lodovico Fogliano[1] († 1539), dont les idées furent développées quelques années plus tard par Gioseffo Zarlino[2] (1517-1590), imaginèrent un nouveau système qui résoudrait ce problème.

[1] *Musica theorica*, Venise, 1529 ; rééd. en fac-similé, New York, 1969.
[2] *Istitutioni Harmoniche*, Venise, 1558 ; rééd. en fac-similé, New York, 1965.

3.1. Le tempérament zarlinien

Zarlino mit au point un tempérament dont l'ossature serait fournie par le cycle des quintes, à l'exception des tierces qui, pour être pures, proviendraient directement de la série harmonique.

3.1.1. Construction

Sur la note *do* prise comme point de départ, on construit symétriquement deux quintes, une ascendante et une descendante (en fait une quarte ascendante) ; sur les degrés *fa* et *sol* obtenus, on place à nouveau deux quintes pour obtenir les degrés *do* (déjà présent) et *ré*. Ces trois accords de quinte à vide sont enfin complétés par des tierces strictes, c'est-à-dire de rapport 5/4 (fig. 67) :

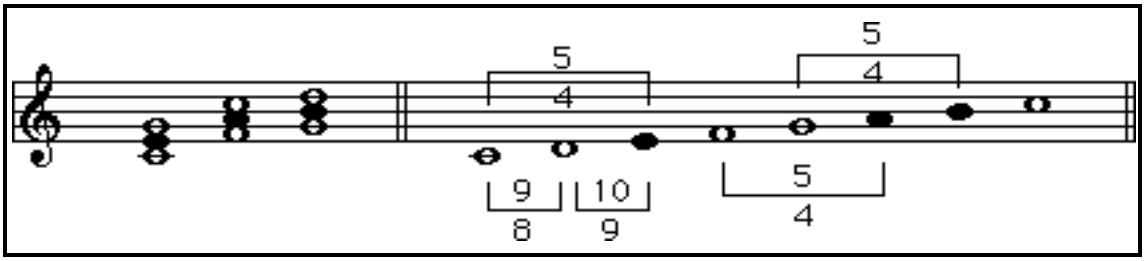


Fig. 67 : le tempérament zarlinien

Pour les distinguer les uns des autres, les degrés d'origine pythagoricienne obtenus par le cycle des quintes sont écrits en rondes, les degrés provenant de la série harmonique en notes noircies.

La gamme de Zarlino est fondamentalement différente de celle de Pythagore en ce qu'elle introduit une inégalité entre des intervalles de même nature, comme le montre un examen de sa structure.

La tierce *do-mi* vaut par définition 5/4, et le ton *do-ré*, obtenu par superposition de deux quintes, 9/8 ; il est clair que le ton *ré-mi* ne peut avoir la même valeur que *do-ré* sous peine de constituer à nouveau une tierce pythagoricienne. Pour connaître le rapport de cette seconde majeure, il suffit de retrancher de la tierce la valeur du ton pythagoricien, ce qui donne :

$$\frac{5}{4} \div \frac{9}{8} = \frac{10}{9}$$

La tierce majeure zarlinienne comprend donc deux sortes de secondes : un *ton majeur* à 9/8 valant 204 cents, et un *ton mineur* (à ne pas confondre avec une seconde mineure) à 10/9 qui vaut 182 cents. La différence entre ces deux tons est par conséquent d'un comma syntonique (cf. supra). La tierce mineure s'obtient en retranchant la tierce majeure de la quinte :

$$\frac{3}{2} \div \frac{5}{4} = \frac{6}{5}$$

La présence de deux tons différents implique quatre sortes de demi-tons : au *limma* et à l'*apotome* issus du ton pythagoricien à 9/8 s'ajoutent les demi-tons provenant du ton mineur zarlinien à 10/9. Ils se calculent exactement comme les autres intervalles. Le demi-ton diatonique se trouve entre la tierce majeure et la quarte juste :

$$\frac{4}{3} \div \frac{5}{4} = \frac{16}{15}$$

Ce demi-ton est appelé *diaton naturel* (ou demi-ton majeur), et vaut 112 cents ; le demi-ton chromatique (10/9 ÷ 16/15 = 25/24), ou *chromate* (ou encore demi-ton mineur), vaut 71 cents. La

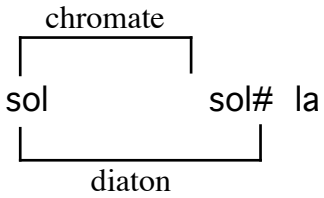
différence entre les deux, le **comma enharmonique**[1] (ou diésis), qui mesure 41 cents, est nettement plus importante (presque le double) qu'entre les deux demi-tons pythagoriciens.

3.1.2. Valeur musicale

Le système zarlinien est d'une grande complexité, dans la mesure où les mêmes noms de notes ne s'appliquent pas toujours aux mêmes sons. Par exemple, le *la* considéré comme quinte de *ré* ne correspond pas au rapport strict 3/2 : il ne saurait donc être à la même hauteur que le *la* pris comme tierce de *fa*, ce qui implique deux touches pour la même note.

La transposition rigoureuse est parfois impossible, du fait de la disposition des intervalles. Entre les tonalités d'*ut* et de *sol*, par exemple, la succession des tons majeurs et mineurs n'est pas identique : en *ut*, un ton majeur se situe entre la tonique et le deuxième degré, un ton mineur entre le deuxième et le troisième degré, alors qu'en *sol*, c'est l'inverse.

Les difficultés pratiques deviennent inextricables avec l'utilisation du chromatisme, et nous n'entrerons pas dans les détails. Remarquons seulement que du fait que le diaton est plus grand que le chromate, le bémol se trouve plus haut que le dièse dans la gamme de Zarlino :



Un tel tempérament confère à la musique un caractère plutôt statique dans le diatonisme, mais au contraire très dynamique et tendu avec le chromatisme.

3.2. Application au clavier

Dans sa forme théorique, le tempérament zarlinien n'est guère utilisable en pratique, particulièrement par les instruments à clavier. D'une façon générale, les systèmes à intonations pures offrent peu de tonalités : les accords vraiment stricts n'y sont pas nombreux, et les accords non purs trop dissonants. C'est pourquoi certains théoriciens du XVI^{e} siècle imaginèrent des claviers à plusieurs touches par notes. Ainsi, Nicola Vicentino (1511-1576), très intéressé par le problème de la musique chromatique et enharmonique de la théorie grecque, construisit un clavecin appelé *archicembalo*, qui possédait 6 claviers, 132 touches, et dans lequel l'octave est divisée en 31 intervalles[2]. D'autres essais du même ordre furent réalisés ou décrits, notamment par Michael Praetorius (1571-1621) avec un *clavicymbel* comprenant 77 touches et 18 sons, ou Giovanni Battista Doni (v. 1594-1647), inventeur du clavecin *essarmonici*. Aucun de ces instruments ne parvint jamais à s'imposer.

4. Les tempéraments mésotoniques

4.1. Principes de base

L'introduction de la tierce naturelle dans le système pythagoricien présente donc en pratique des difficultés considérables. C'est pourquoi, dès la fin de la Renaissance, les théoriciens ont réalisé des tempéraments certes inspirés des considérations de Zarlino, mais dans un esprit pragmatique. D'une façon générale, les systèmes proposés apparaissent toujours comme des compromis entre deux exigences normalement incompatibles entre elles : d'un côté, offrir le plus possible d'intervalles stricts, particulièrement les tierces majeures, de l'autre, disposer d'un maximum de tonalités exploitables.

---

[1] Le comma enharmonique se définit comme le rapport existant entre une octave et 3 tierces majeures naturelles consécutives, soit $2/(5/4)^3$.

[2] Les plans de cet instrument figurent dans le 5^{e} livre de son traité *L'antica musica ridotta alla moderna prattica*, Rome, 1555 ; rééd. en fac-similé, Kassel, 1959.

Toute la problématique des tempéraments inégaux tourne autour de cette contradiction, le « compromis » consistant à altérer dans une mesure plus ou moins acceptable par l'oreille tel ou tel intervalle, afin de gagner quelques possibilités de modulation ou de transposition. On comprend alors pourquoi les solutions sont nombreuses — on les compte par dizaines — imparfaites par nature, mais stimulantes pour l'imagination des théoriciens et l'oreille des compositeurs…

4.2. Le tempérament mésotonique classique

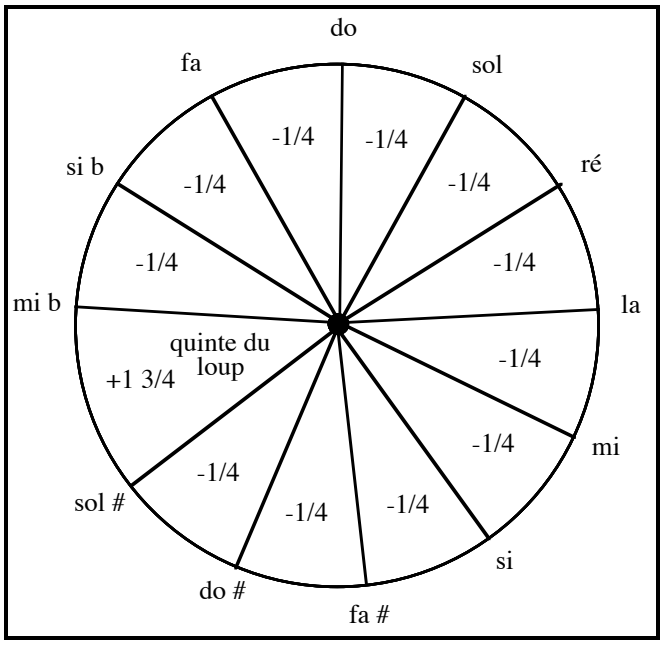


Fig. 68 : le système mésotonique classique

Le plus important des systèmes mésotoniques fut probablement le tempérament à 8 tierces pures, dont l'invention est attribuée au grand théoricien italien Pietro Aaron (v. 1480/90-1545). Son principe consiste à accorder sans battements — donc au rapport 5/4 — 8 tierces majeures. Puisque 4 quintes strictes consécutives donnent, après réduction des octaves, une tierce plus grande que pure d'un comma syntonique, il suffit de raccourcir chacune d'entre elles du quart de cette valeur (fig. 68). Le déficit ainsi accumulé au cours du cycle est reporté sur la quinte *sol#-mib*, « quinte du loup » absolument inutilisable (en réalité une sixte diminuée). Comme l'indique le diagramme ci-dessus, cette quinte dépasse la valeur 3/2 de 1 comma 3/4. Ce nombre s'explique ainsi : 11 quintes sont amputées de 1/4 de comma, et comme 12 quintes dépassent l'octave de 1 comma pythagoricien, nous obtenons :

$$11/4 - 4/4 = 7/4 = 1 \text{ comma } 3/4^{1}.$$

Les 8 tierces pures sont celles comprises entre *mib-sol* et *mi-sol#*, les 4 restantes (en réalité des quartes diminuées), de *si-mib* à *sol#-do*, étant inutilisables, puisqu'égales à des tierces pythagoriciennes (7/4 – 3/4 = 1 tierce majeure + 1 comma syntonique).

Un tel tempérament offre évidemment beaucoup de tierces strictes, mais laisse peu de tonalités vraiment praticables. Peuvent être joués, outre ut majeur et la mineur, les tons à 1 et 2 bémols, et à 1, 2 et 3 dièses, avec évidemment les relatifs mineurs. Mais les compositeurs ne se limitaient pas strictement à ces possibilités et, par le jeu des notes de passage, des agréments et ornementations, ou tous autres artifices du même ordre, faisaient passer dans l'harmonie des intervalles normalement inacceptables. La structure du tempérament permet souvent d'expliquer tel ou tel tour

[1] Du fait du partage du comma syntonique (et non pythagoricien), la quinte du loup est plus petite qu'indiquée de la valeur d'un comma schisma.

stylistique, parfois une « bizarrerie » dans la conduite mélodique ou harmonique. L'analyse des œuvres de cette époque devrait en tenir compte, et ne pas supposer, comme c'est souvent le cas, les intervalles égaux entre eux.

4.3. Les tempéraments mésotoniques à tierces majeures altérées

D'autres solutions, moins radicales que le mésotonique à 8 tierces pures, ont été proposées. Leurs structures, différentes dans leur réalisation, restent proches dans leurs principes : altérer très légèrement les tierces strictes pour rendre moins dures les tierces majeures restantes et diminuer la taille de la quinte du loup. Ainsi, le tempérament de Sauveur (1701) ampute les 11 premières quintes de 1/5 de comma syntonique, de sorte que la 12e dépasse la valeur stricte de 1 comma 1/5, les 8 bonnes tierces n'excédant le rapport naturel que de 1/5 de comma ; quant aux 4 tierces restantes, elles sont inférieures au rapport pythagoricien (de 3/5 de comma syntonique exactement).

Une autre idée, datant du XVIe siècle, consiste à réaliser successivement 9 tierces mineures pures, en réduisant 11 quintes de 1/3 de comma syntonique ; les tierces majeures sont plus petites que la valeur naturelle de 1/3 de comma (c'est-à-dire 81/64 moins 4/3 de comma syntonique), mais la quinte du loup se retrouve alors trop grande de 2 commas 2/3, ce qui est considérable.

5. Les tempéraments de transition

5.1. Principes et caractéristiques

Dès la fin du XVIIe siècle, les compositeurs ressentent de plus en plus mal les limitations tonales imposées par les tempéraments mésotoniques, alors que dans le même temps, les théoriciens conçoivent d'autres solutions qui, moyennant une réduction du nombre des tierces majeures naturelles, permettent de jouer pratiquement dans tous les tons. Ces systèmes, plus ou moins proches du tempérament actuel, demeurent néanmoins fondamentalement tributaires de l'inégalité des intervalles.

5.2. Exemples de réalisation

En France, la tendance à réduire le nombre de tierce majeures pures fut radicalement appliquée au milieu du XVIIIe siècle, au point n'en conserver parfois qu'une seule. Jean-Jacques Rousseau a décrit en 1767 un tel tempérament, qui autorise à ce prix presque toutes les tonalités[1]. Il est instructif d'en étudier la réalisation pratique à partir du texte même de Rousseau, à savoir l'article « tempérament » du *Dictionnaire de Musique* : cela donne une idée précise de la manière dont les théoriciens procédaient à l'époque, et fait ressortir à la fois le mélange d'empirisme et de précision qui caractérise l'accord d'un clavier :

> « 1° On commence par l'ut du milieu du clavier, et l'on affoiblit les quatre premières quintes en montant jusqu'à ce que la quatrième mi fasse la tierce majeure bien juste avec le premier son ut ; ce qu'on appelle la première preuve. 2° En continuant d'accorder par quintes, dès qu'on est arrivé sur les dièses, on renforce un peu les quintes, quoique les tierces en souffrent ; et quand on est arrivé au sol dièse, on s'arrête : ce sol dièse doit faire avec le mi une tierce majeure juste ou du moins souffrable ; c'est la seconde preuve. 3° On reprend l'ut et on accorde les quintes au grave, savoir, fa, si bémol, etc., foibles d'abord puis les renforçant par degrés, c'est-à-dire affoiblissant les sons jusqu'à ce qu'on soit parvenu au re bémol, lequel, pris comme ut dièse, doit se trouver d'accord et faire

[1] Rousseau reprend presque mot pour mot une description donnée par D'Alembert dans la première édition de ses *Élémens de musique théorique et pratique, selon les principes de M. Rameau*, Paris, 1752, p. 48. Or, comme l'a remarqué P.-Y. Asselin, une erreur s'est glissée dans ce texte : au 3°, en repartant d'*ut* pour accorder les quintes vers le grave, on va jusqu'au *réb*, ce qui oblige à retoucher le *sol#* déjà accordé. Il faut donc s'arrêter au *lab* qui doit correspondre au *sol#*. D'Alembert avait rectifié cette erreur dès sa Nouvelle édition (1762, p. 55 sq.), mais Rousseau ne s'en est apparemment pas rendu compte.

> quinte avec le sol dièse auquel on s'était ci-devant arrêté ; c'est la troisième preuve. Les dernières quintes se trouveront un peu fortes, de même que les tierces majeures ; c'est ce qui rend les tons majeurs de si bémol et de mi bémol sombres et même un peu durs : mais cette dureté sera supportable si la partition est bien faite (...) Les organistes et les facteurs regardent ce tempérament comme le plus parfait que l'on puisse employer ».

Dans ce système, seule la tierce *do-mi* est stricte, 4 quintes sont amputées d'1/4 de comma syntonique, les 8 autres étant très proches (en plus ou en moins) de la valeur naturelle.

En Allemagne, la recherche de l'élargissement tonal commença très tôt, si l'on se réfère au célèbre tempérament[1] d'Arnold Schlick (1511), lequel ne comprend aucune tierce vraiment pure, mais autorise 9 des 12 tonalités majeures. Par un retour à l'esprit pythagoricien, un certain nombre de quintes sont laissées pures, et d'autres raccourcies d'une fraction de comma pour adoucir quelques tierces majeures. Ainsi, le tempérament Werckmeister III[2] (1691) enchaîne-t-il 3 quintes réduites de 1/4 de comma pythagoricien (*do* à *la*), 2 quintes pures (*la* à *si*), une quinte raccourcie de même (*si-fa#*), et termine le cycle par des quintes strictes. Une telle disposition exclut toute tierce majeure pure, admet 3 tierces pythagoriciennes, les autres étant plus grandes que strictes d'une fraction variable de comma pythagoricien.

Un autre exemple important de tempérament de transition est fourni par ce qu'il est convenu d'appeler le Kirnberger II, datant de 1771 (fig. 69) :

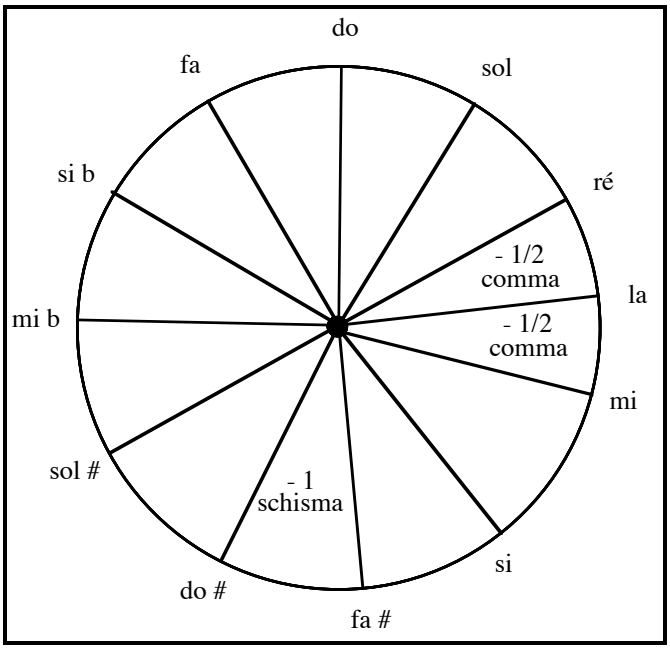


Fig. 69 : le tempérament Kirnberger II

Son principe consiste à réduire 2 quintes consécutives d'1/2 comma syntonique, toutes les autres étant accordées au rapport strict 3/2. Il en résulte 3 tierces majeures pures (*do-mi*, *sol-si*, *ré-fa#*) et 4 tierces majeures pythagoriciennes (de *do#-fa* à *sib-ré*). Tous ces tempéraments permettent de jouer dans les 24 tonalités majeures et mineures.

[1] A. Schlick, *Spiegel der Orgelmacher und Organisten*, Spire, 1511. Trad. franç. par C. Meyer, Paris, 1978-1979.
[2] Cf. infra § 6.2.2.

5.3. Valeur musicale des tempéraments inégaux

Les musiciens des XVII^e^ et XVIII^e^ siècle ont su tirer parti de l'inégalité des intervalles et des caractères spécifiques qu'elle confère aux différentes tonalités. Rousseau, par exemple, commente, à propos de son tempérament :

> « les tons naturels jouissent par cette méthode de toute la pureté de l'harmonie, et les tons transposés, qui forment des modulations moins fréquentes, offrent de grandes ressources au musicien, quand il a besoin d'expressions plus marquées. »[1]

Rameau, pour une fois d'accord avec Rousseau, écrit pour sa part :

> « les habiles Musiciens sçavent profiter à propos de ces differens effets des Intervalles, & font valoir par l'expression qu'ils en tirent, l'alteration qu'on pourroit y condamner. »[2]

Nous reviendrons sur ce sujet plus longuement, en évoquant l'ethos des tonalités.

6. Le tempérament égal

Face aux complications entraînées par tous les systèmes d'accord inégaux quels qu'ils soient, le tempérament égal propose une méthode radicalement différente : la division de l'octave en *n* parties égales, abandonnant la justesse naturelle, et acceptant les battements qui se produisent inévitablement dans tous les intervalles de la gamme, octave exceptée.

6.1. Perspective historique

Une erreur d'appréciation largement répandue, ou plus probablement une méconnaissance des faits réels, a conduit certains à présenter cette démarche non seulement comme un progrès décisif de l'histoire de la musique, mais comme une découverte providentielle de la fin du XVII^e^ siècle, dans laquelle se seraient engouffrés avec enthousiasme les compositeurs et leurs interprètes.

La réalité est différente, et si ce n'était le cas, on serait en droit de s'étonner que des théoriciens susceptibles d'inventer les systèmes si compliqués de la Renaissance et de l'époque baroque n'aient pas été capables d'imaginer une solution aussi simple dans son principe.

L'idée de diviser l'octave en 12 parties égales est en réalité ancienne : elle est notamment attestée en Chine dès le XVI^e^ siècle, mais il ne s'agit là que de spéculations abstraites et l'accord ne fut pas réalisé en pratique. En Occident, Michael Prætorius (v. 1571-1621) indique en 1619 que la division du manche de la viole de gambe et du luth donne des demi-tons égaux[3]. Marin Mersenne (1588-1648) confirme ce fait et en donne un calcul très précis[4]. Mais il précise toutefois :

> « Je ne sçache personne que le sieur Gallé, qui ayt accomodé cet accord à l'orgue & à l'épinette (...) les Quintes sont si peu diminuées, qu'il n'est pas quasi possible de les distinguer d'avec les justes : n'y ayant que les Tierces majeures trop fortes d'un peu plus que d'un demy comma ; ce qui blesse l'oreille de nos Praticiens, qui ne l'ont pas accoustumée à cet accord (...) Les demitons égaux ont aussi ésté jugez trop petits pour faire les cadences agréables (...) Il est certain que l'Orgue & l'Epinette estans tempérées selon le manche des Luths & des Violes, les concerts qui en réussiront, paroistront plus justes, à raison de la convenance de leurs accords. Mais nos Praticiens ne sont pas d'avis de changer l'accord de l'Epinette, pour la contraindre à l'accord du Luth, de peur de quitter la perfection de leurs

[1] J.-J. Rousseau, *Dictionnaire de Musique*, art. tempérament, Genève, 1767.
[2] J.-P. Rameau, *Nouveau Systême de Musique Theorique*, Paris, 1726, p. 110.
[3] M. Prætorius, *Syntagma musicum*, 1619, Livre II, *De Organographia*, chap. XL.
[4] M. Mersenne, *Harmonie Universelle*, 1636, *Livre premier*, Proposition XIV.

> Tierces, et de leurs demi-tons, qui font l'une des plus grandes beautez, & variétez de la Musique. »[1]

Ce texte montre clairement que le tempérament égal était connu au début du XVII^e siècle, utilisé par les instruments à cordes pincées et frottées, et rejeté pour les instruments à clavier par la plupart des musiciens.

6.2. Le tempérament à 12 demi-tons égaux

Le tempérament égal actuel a été complètement décrit par Johann Georg Neidhart (v. 1685-1739) en 1732[2] : il consiste tout simplement en la répartition régulière du comma pythagoricien sur les 12 quintes. Mathématiquement, cela donne :

$$\sqrt[12]{2} = 1{,}059463$$

ce qui peut aussi s'écrire : $2^{1/12}$.

Ce résultat représente la valeur par laquelle il faut multiplier (ou diviser) une fréquence pour obtenir celle du demi-ton tempéré supérieur (ou inférieur). La quinte tempérée est peu éloignée de la quinte stricte, d'un comma schisma environ.

Tous les intervalles du tempérament égal peuvent se calculer à partir de la formule indiquée ci-dessus : soit sous forme de racine douzième de 2 élevée à la puissance n (nombre de demi-tons contenus dans l'intervalle), soit sous forme de puissance fractionnaire du type $2^{n/12}$. Par exemple, la 3^ce majeure, qui comprend 4 demi-tons, est égale à :

$$\left(\sqrt[12]{2}\right)^4 = \sqrt[3]{2} = 2^{\frac{1}{3}} = 1{,}259921$$

$$\frac{1200 \log 1{,}259921}{\log 2} = 400 \text{ cents}$$

Extraire la racine douzième d'un nombre n'est pas simple, et il fallut, pour un calcul précis, l'apparition de la première table de logarithme (calculée dès 1588 par le Suisse Jobst Bürgi, mais publiée par John Neper en 1614). Auparavant, on se servait d'une formule approchée mais facile à réaliser : le rapport 18/17, valant 1,05882, soit un tout petit peu moins (1 cent) que la valeur exacte du demi-ton tempéré. La pression du doigt augmentant légèrement la tension de la corde, donc sa fréquence, on peut admettre que ce tempérament était parfaitement réalisé dans la pratique.

Le tableau ci-dessous indique la fréquence théorique des notes de musique calculée à partir du diapason légal, c'est-à-dire du *la*$_3$ à 440 Hz :

[1] Ibid., *Nouvelles observations*, 7^e observation.

[2] J.G. Neidhart, *Gänzlich erschöpfte mathematische Abtheilungen des diatonisch-chromatischen temperirten Canonis monochordi*, Königsberg, 1724.

Octaves	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
do	16,4	32,7	65,4	131	262	523	1047	2093	4186	8372	16 744
do#-réb	17,3	34,6	69,3	139	277	554	1109	2217	4435	8870	17 740
ré	18,4	36,7	73,4	147	294	587	1175	2349	4699	9397	18 795
ré#-mib	19,4	38,9	77,8	156	311	622	1245	2489	4978	9956	19 912
mi	20,6	41,2	82,4	165	330	659	1319	2637	5274	10 548	21 096
fa	21,8	43,7	87,3	175	349	698	1397	2794	5588	11 175	22 351
fa#-solb	23,1	46,2	92,5	185	370	740	1480	2960	5920	11 840	23 680
sol	24,5	49,0	98,0	196	392	784	1568	3136	6272	12 544	25 088
sol#-lab	26,0	51,9	104	208	415	831	1661	3322	6645	13 290	26 580
la	27,5	55,0	110	220	**440**	880	1760	3520	7040	14 080	28 160
la#-sib	29,1	58,3	117	233	466	932	1865	3729	7459	14 917	29 834
si	30,9	61,7	123	247	494	988	1976	3951	7902	15 804	31 609

Fig. 70 : fréquences du tempérament égal

6.2.1. Valeur musicale

Le tempérament égal propose donc un compromis maximum en ce qu'il fausse tous les intervalles (à l'exception de l'octave) mais donne en échange l'accès facile à toutes les tonalités. Il ne s'agissait donc pas d'un progrès, on l'a vu, mais d'une résignation rendue nécessaire par l'évolution du langage harmonique et du besoin ressenti par les musiciens d'élargir leur horizon tonal. Les réticences furent nombreuses à l'adoption du nouveau système, pour les raisons déjà invoquées par Mersenne, particulièrement la fausseté des tierces. En France et en Allemagne, au cours du XVIII^{e} siècle, les orgues continuèrent d'être accordés en mésotonique ou selon les systèmes de transition ; l'Angleterre se montra plus conservatrice encore et les tempéraments inégaux eurent droit de cité jusqu'à la fin du XIX^{e} siècle.

Rameau, d'abord ardent défenseur du tempérament inégal, fit une volte-face spectaculaire, et préconisa la nouvelle formule dans l'un de ses traités :

> « Prenez telle Touche du Clavecin qu'il vous plaira, accordez-en d'abord la Quinte juste, puis diminuez-la si peu que rien, procédez ainsi d'une Quinte à l'autre, toujours en montant, c'est-à-dire, du grave à l'aigu, jusqu'à la dernière, dont le Son aigu aura été le grave de la première, vous pouvez être certain que le Clavecin sera bien d'accord (...) Si le plus simple est le plus facile & le plus naturel, donc notre Temperamment doit l'emporter sur celui qui est en usage ; & nous ne voïons pas quelle raison peut empêcher de l'adopter, puisque tout parle en sa faveur ; sa facilité, sa simplicité, sa justesse, & sur-tout son rapport avec les Instrumens sans Touches, comme le Violon, qui sont les plus parfaits (...)»[1]

On appréciera au passage le « si peu que rien » qui côtoie, dans l'ouvrage de Rameau, d'austères formules arithmétiques permettant des calculs d'une précision supérieure au millième…

Mais plus encore que le défaut de justesse, c'est l'uniformité du système qui choquait le plus. Toutes les tonalités deviennent certes possibles mais sont identiques entre elles, perdant ainsi leur couleur propre, leur « énergique variété » selon l'expression de Rousseau.

6.2.2. Le *Wohltemperierte Klavier* de J.-S. Bach

C'est dans ce contexte qu'il convient d'évoquer l'œuvre célèbre de J.-S. Bach. La musicologie moderne admet aujourd'hui sans conteste que, contrairement à la croyance courante, le *Clavier bien tempéré* n'a pas été écrit pour le tempérament égal, mais bel et bien pour un tempérament inégal.

[1] J.-P. Rameau, *Génération harmonique*, Paris, 1737, p. 100 sq.

Voyons les faits. Le titre, d'abord, est peu explicite : *wohl* ne signifie pas égal mais plutôt « à l'aise », « dans lequel on se sent bien ». Et surtout, l'expression *wohltemperiert* figure déjà dans le sous-titre du traité *Musikalische Temperatur* (1686) de Andreas Werckmeister (1645-1706), dont voici la traduction :

« *Instruction mathématique claire et véridique de la manière de bien tempérer* [wohltemperiert] *un clavier par l'enseignement du monocorde, en particulier les orgues, positifs, régales, épinettes et autres afin que l'on puisse faire un usage harmonieux et agréable de tous les tons à dièses et à bémols de notre époque…* »

Dans cet ouvrage, l'auteur indique plusieurs formules de tempéraments inégaux, bien connus des spécialistes à l'heure actuelle, et baptisés selon l'usage Werckmeister I, II, III, etc. (cf. supra).

Or, certains musicologues ont attribué la paternité du tempérament égal à Werckmeister, ce qui est inexact ; il est vrai toutefois que celui-ci en donne une description correcte et l'adopte définitivement, mais dans un autre traité, publié dix ans plus tard[1]. Le terme *wohltemperiert* n'y figure plus, et c'est sans doute l'origine de la confusion sur le titre de l'œuvre de Bach.

D'autre part, l'opinion selon laquelle Bach aurait opté pour le tempérament égal ne repose que sur un seul et unique témoignage, celui de Friedrich Marpurg (1718-1795), grand admirateur et propagateur en Allemagne des idées de Rameau[2] qu'il connut à Paris en 1746, précisément à l'époque ou celui-ci s'était déjà rallié au tempérament égal.

Cette thèse fut combattue à l'époque par les propres fils de J.-S. Bach, notamment par Carl Philipp Emanuel[3], et par certains de ses élèves, au premier rang desquels Johann Philipp Kirnberger (1721-1783), théoricien et compositeur qui étudia avec Bach de 1739 à 1741. Dans son traité *Die Kunst des Reinen Satzes in der Musik* (1771-1779), il affirme suivre l'enseignement de son maître, déclare très mauvais le tempérament égal, et propose deux systèmes d'accord inégal connus aujourd'hui sous les noms de Kirnberger I et II (cf. supra). C'est probablement pour une formule de ce type qu'a été composé le *Wohltemperierte Klavier.*

Au reste, le caractère démonstratif de cette œuvre n'aurait guère de sens s'il avait effectivement été écrit pour le système à 12 demi-tons égaux, puisque celui-ci altère la justesse de tous les intervalles pour permettre précisément ces possibilités. La démonstration prend en revanche toute sa valeur s'il s'agit d'un tempérament inégal, qui conserve un certain nombre de tierces strictes ou battant peu mais autorise l'ensemble des tonalités majeures et mineures, comme c'est le cas avec le Werckmeister III… On comprend mieux ainsi pourquoi Bach revint sur ce problème vingt ans après le *Premier cahier*, et composa en 1742 une deuxième partie calquée sur le modèle de la première, probablement pour un tempérament proche du Kirnberger II.

Bach ne fut ni le premier ni le seul à écrire ce genre d'œuvre à la fois didactique et théorique (même si la réussite de la sienne est incomparable). Le musicologue André Pirro a montré que sur les 24 Suites de Johann Pachelbel, 17 se suivent dans l'ordre des tons majeurs et mineurs, les 7 manquantes correspondant aux tonalités les plus chargées en dièses ou en bémols ; l'*Ariadne Musica* (v. 1702) de Johann Caspar Fischer est conçue comme un fil qui guide les organistes dans le dédale d'une vingtaine de tonalités ; Johann Mattheson propose dans son *Exemplarische Organistenprobe im Artikel vom General-Baß*, paru en 1719, un modèle d'accompagnement pour toutes les tonalités ; Johann David Heinichen compose en 1728 un *Kleines harmonisches Labyrinth* dont les qualités l'ont fait attribuer par erreur à Bach lui-même (BWV 591). De tels exemples sont nombreux, surtout en Allemagne et en Italie.

Le *Wohltemperierte Klavier* est actuellement joué (et enregistré) sur des clavecins accordés selon divers tempéraments, dont ceux de Werckmeister et de Kirnberger : l'œuvre sonne parfaitement bien, les différentes tonalités n'ont pas le même caractère, et le contraste est renforcé entre les tons à dièses et à bémols, surtout avec les armatures chargées.

---

[1] A. Werckmeister, *Hypomenata Musica*, Quedlindburg, 1697.

[2] F. Marpurg, *Versuch über die musikalische Temperatur*, Breslau, 1776.

[3] C.P.E. Bach, *Versuch über die wahre Art das Clavier zu spielen*, Berlin, 1753. [Essai sur la vraie manière de jouer du piano, trad. fr., Paris, 1979].

6.3. Le tempérament de Holder

Vers 1675, un certain Nicolas Mercator[1] eut l'idée d'un tempérament égal, divisant l'octave non pas en 12 demi-tons, mais en 53 commas égaux. À sa suite, le théoricien anglais William Holder (1616-1697) en fournit les calculs complets[2]. L'expression numérique de ce comma s'écrit :

$$\sqrt[53]{2} = 1{,}01316$$

ou encore :

$$2^{1/53}$$

Le comma de Holder vaut 22,6 cents. Ce tempérament ne fut jamais adopté en pratique, et il serait inutile de l'évoquer s'il ne se trouvait à la source d'une confusion très répandue : c'est dans ce système uniquement que le ton vaut 9 commas, divisé lui-même — en référence aux principes pythagoriciens — en un petit demi-ton diatonique à 4 commas, et un demi-ton chromatique plus grand à 5 ; une gamme majeure se compose alors de 5 tons + 2 demi-tons diatoniques soit 53 commas. Attribuer de telles valeurs au tempérament égal, comme le font parfois encore certains manuels de solfège ou de théorie musicale n'a aucun sens : le ton n'y vaut pas 9 commas, et les demi-tons diatoniques et chromatiques sont par définition égaux entre eux.

Cependant certains interprètes, comme les violonistes, les chanteurs, et d'une façon générale tous ceux qui « fabriquent » la hauteur, font la différence entre les dièses et les bémols, sont sensibles à l'attraction, etc. C'est tout simplement qu'ils ne jouent pas rigoureusement selon le tempérament égal, et qu'ils ne pourraient d'ailleurs pas le faire avec une précision parfaite (cf. chap. XIV). Tant mieux pour la musique.

7. L'ethos des tonalités

7.1. Différentes appréciations

La principale caractéristique des tempéraments inégaux est donc d'ordonner des successions d'intervalles non identiques selon les tonalités : les différentes gammes possèdent alors des couleurs variées et produisent des effets, des sentiments particuliers, un « ethos » spécifique.

Les Grecs déjà avaient attribué un ethos à chacun de leurs modes et, probablement dans un esprit d'imitation, cette pratique se généralisa à la fin du XVII^{e} siècle. Marc-Antoine Charpentier (v. 1634-1704) explique que les transpositions servent principalement à « *l'expression des différentes passions, à quoi la différente énergie des modes est très propre*. » Puis il dépeint ainsi les caractères attachés aux différents tons[3] :

ut majeur	:	gai et guerrier
ut mineur	:	obscur et triste
ré majeur	:	joyeux et très guerrier
ré mineur	:	grave et dévot
mib majeur	:	cruel et dur
mib mineur	:	horrible, affreux
mi majeur	:	querelleux et criard
mi mineur	:	effemmé (sic), amoureux et plaintif
fa majeur	:	furieux et emporté
fa mineur	:	obscur et plaintif
sol majeur	:	doucement joyeux
sol mineur	:	sérieux et magnifique
la majeur	:	joyeux et champêtre
la mineur	:	tendre et plaintif
sib majeur	:	magnifique et joyeux
sib mineur	:	obscur et terrible

[1] Qu'il ne faut pas confondre avec Gerardus Mercator, le grand géographe et mathématicien flamand.

[2] W. Holder, *A treatise on the Natural Grounds and Principles of Harmony*, Londres, 1694.

[3] M.-A. Charpentier, *Règles de composition*, Paris, s.d.

si majeur : dur et plaintif
si mineur : solitaire et mélancolique

On constate que Charpentier ne cite (ou n'utilise) que 18 tonalités sur les 24 possibles, et que parmi celles-ci, certaines sont peu exploitables ; on notera aussi le caractère fortement marqué des tons comportant plus de trois altérations.

Il est intéressant de comparer cette nomenclature avec celle de Rameau — qui ne connaissait vraisemblablement pas ce texte de Charpentier resté inédit — rédigée une trentaine d'années plus tard :

> « Le Mode majeur pris dans l'Octave des Nottes, *Ut*, *Ré* ou *La*, convient aux Chants d'allegresse & de rejoüissance ; dans l'Octave des Nottes *Fa* ou *Sib*, il convient aux tempestes, aux furies & autres sujets de cette espece. Dans l'Octave des Nottes *Sol* ou *Mi*, il convient également aux chants tendres & gais ; le grand & le magnifique ont encore lieu dans l'Octave des Nottes *Ré*, *La* ou *Mi*.
> Le Mode mineur pris dans l'Octave des Nottes *Ré*, *Sol*, *Si* ou *Mi*, convient à la douceur & à la tendresse ; dans l'Octave des Nottes *Ut* ou *Fa*, il convient à la tendresse et aux plaintes ; dans l'Octave des Nottes *Fa* ou *Sib*, il convient aux Chants lugubres. Les autres Tons ne sont pas d'un grand usage, & l'experience est le plus sûr moyen d'en connoître la proprieté. »[1]

Les connotations perçues par les musiciens habitués à ces tempéraments nous surprennent souvent par leur vigueur. Toujours Rameau, dans un autre texte, soutient que :

> « nous recevons des impressions differentes des intervales, à proportion de leur differente alteration : Par exemple, la *Tierce majeure* qui nous excite naturellement à la joye, selon ce que nous en éprouvons, nous exprime jusqu'à des idées de fureur, lors qu'elle est trop forte ; & la *Tierce mineure* qui nous porte à la douceur & à la tendresse, nous attriste lors qu'elle est trop foible. »[2]

7.2. Ethos des tonalités et tempérament égal

Il faut tout d'abord bien comprendre que le caractère des tonalités est absolument indépendant de la hauteur absolue (qui n'était d'ailleurs pas fixée à cette époque, cf. chap. XVI). C'est le rapport entre les intervalles et leurs différentes proportions qui crée la variété des impressions. En tout état de cause, des ethos différents sont par définition impossibles avec le tempérament égal, où quel que soit le ton, la succession des valeurs reste identique.

À quoi attribuer alors la permanence de telles nomenclatures dans des traités théoriques du XIX^e^ et même du XX^e^ siècle ? À « *l'habitude invétérée des théoriciens de se copier les uns sur les autres sans réfléchir à ce qu'ils écrivent* » ? (J. Chailley) Pour une part, sans doute, car il est difficile d'expliquer autrement des assertions comme celles de Louis Lacombe qui préconise ut mineur pour les expressions pathétiques, ré majeur pour les chants éclatants, fa mineur dans les expressions lugubres et sombres, etc.[3]. Ou celle d'Albert Lavignac qui établit lui aussi sa propre liste : ut majeur simple, naïf, franc ou plat et commun ; ré majeur gai, brillant, alerte ; mib majeur sonore, énergique, chevaleresque ; lab majeur doux, caressant, ou pompeux ; ut# mineur brutal, sinistre ou très sombre ; fa mineur morose, chagrin, ou énergique ; sol mineur mélancolique, ombrageux, etc.[4]. À noter qu'une telle description figurait dans la 1^re^ édition du *Traité général d'instrumentation* (Gand, 1863, p. 189) de François Gevaert et fut supprimée des éditions suivantes.

En dehors des généralisations abusives, il existe certainement des causes obscures et mal connues qui conditionnent notre attitude vis-à-vis des rapports tonals. Le problème se pose

[1] *Traité de l'harmonie réduite à ses principes naturels…*, Paris, 1722, p. 157.
[2] *Nouveau Systême de Musique Théorique*, p. 110.
[3] L. Lacombe, *Philosophie et Musique*, Paris, 1896.
[4] A. Lavignac, *La Musique et les Musiciens*, Paris, 1895, p. 423 sq.

évidemment moins avec l'extension de l'atonalité, mais qu'est-ce qui conduit un compositeur à choisir tel ton plutôt qu'un autre ? En théorie ils sont tous équivalents et cependant nous sentons bien que ce n'est pas toujours le cas. Il existe en effet au moins quatre raisons objectives qui pourraient expliquer ce phénomène.

Tout d'abord, certains instruments de musique ne sonnent pas de la même manière dans toutes les tonalités : cela dépend de leur facture ou de leur accord. Un violoniste, par exemple, (accordé sur *sol ré la mi*) peut jouer toutes ses cordes à vide dans le ton de *ré* (majeur ou mineur) et beaucoup de concertos sont pour cette raison écrits dans cette tonalité (par exemple ceux de Vivaldi, Bach, Paganini, Beethoven, Brahms, Bruch, Tchaïkovski, pour s'en tenir aux plus célèbres). À l'opposé, en *fa#* majeur ou en *réb* majeur, il n'en dispose plus d'une seule, et le timbre de l'instrument s'en trouvera modifié, perdra en clarté. Le problème est similaire avec les cuivres qui utilisent les partiels naturels du tuyau : certains tons leur conviennent mieux que d'autres, et ils ne sonnent pas tous de façon identique.

L'exemple du violon permet de bien saisir la différence entre l'échelle des tons et la hauteur absolue : si un violon était accordé un demi-ton plus haut et joué avec les doigtés habituels, une pièce en *ré* sonnerait objectivement en *mib* mais conserverait pour la grande majorité des auditeurs (qui n'ont pas l'oreille absolue) son caractère de *ré* puisque rien ne changerait pour l'exécutant, le nombre de cordes à vide, etc.

D'une façon générale, l'expérience a souvent été faite de transposer les œuvres sans en prévenir les auditeurs, et il est prouvé qu'elles conservent leur caractère d'origine : la *V^e Symphonie* de Beethoven ne devient pas solitaire et mélancolique exécutée un demi-ton plus bas…

La deuxième raison tient au rapport même des tonalités entre elles. Selon Vincent d'Indy, les modulations paraissent monter vers la clarté dans le sens des quintes aiguës (les dominantes), c'est-à-dire par les dièses ; en revanche, elles s'obscurcissent dans le sens des quintes graves (les sous-dominantes), par les bémols. Cette hypothèse[1] semble confirmée tant les exemples sont nombreux.

Beaucoup de musiciens, d'autre part, — et cela tient à l'éducation — entendent instinctivement par rapport à *do*, qui fait office de pivot, de centre à partir duquel partent d'un côté les dièses, de l'autre les bémols ; de la sorte, une tonalité prise isolément l'est en fait par rapport à *do*, et dire qu'en *mi* majeur il y a quatre dièses à la clé, c'est comparer à *do* majeur, qui en possède effectivement quatre de moins. Si la référence était *ré*, le ton de *mi* n'en aurait que deux.

Troisième argument, qui intéresse les musiciens entraînés : le caractère des tonalités semble lié à la lecture plus qu'à l'audition. Des expériences réalisées autrefois à l'Institut de Musicologie par Jacques Chailley ont montré que l'analyse esthétique était en partie conditionnée par l'écriture : des groupes d'étudiants analysant la même partition, mais l'une écrite en *fa#* et l'autre en *solb*, sont parvenus à des conclusions opposées.

Enfin, la mémoire d'œuvres célèbres, comme les symphonies de Beethoven, par exemple, dont les tonalités sont souvent citées, influence l'impression tonale préalable : *ut* mineur tragique, *mib* majeur héroïque, sont des associations qui ont pénétré inconsciemment les esprits, et en premier lieu ceux des compositeurs du XIX^e siècle, influencés eux-mêmes par les œuvres qu'ils admiraient.

Si donc il existe un ethos pour le tempérament égal, il est de nature radicalement différente de celui des autres tempéraments, et relève en grande partie de la psychoacoustique et de la sociologie musicale.

[1] V. d'Indy, *Cours de composition musicale*, 3 vol., Paris, 1900, 1909, 1933.

CHAPITRE XVI

LE DIAPASON

1. La mesure du diapason

Fixer le diapason, au sens moderne du terme, consiste à affecter à une note de musique, généralement le *la* par convention, une fréquence précise, devant servir de référence, notamment pour l'accord des instruments de musique.

Il existe une difficulté principale à la mesure ou à l'établissement du diapason : la fréquence fournie par un tuyau varie avec la célérité du son, et celle-ci avec la température de l'air. Cela signifie que dans tous les instruments à vent, y compris l'orgue, le son monte quand la température augmente.

Voici quelques valeurs théoriques pour le la_3 à différentes températures :

35° 450 Hz
30° 446 Hz
25° 443 Hz
20° 440 Hz
15° 436 Hz
10° 432 Hz

La variation est effectivement très sensible, elle représente par exemple près de 70 cents (plus d'un quart de ton) entre 10° et 35 °C.

D'importants écarts de température peuvent se produire entre le début et la fin d'un concert : n'oublions pas que c'est de l'air à près de 37 °C qu'insufflent les musiciens dans leurs instruments ; l'orgue aussi peut subir de grandes fluctuations de température, entre l'hiver et l'été.

Comme c'est le hautbois — un instrument à vent — qui donne généralement le *la* dans un orchestre, la précision s'avère problématique. Évidemment, la plupart des musiciens, surtout dans les ensembles, rectifient à l'oreille et rétablissent empiriquement, dans la mesure où l'instrument le permet, la hauteur supposée correcte du diapason. C'est toutefois difficile — voire impossible — pour les instruments à trous latéraux, comme les bois, plus aisé pour les tuyaux à anches membraneuses, comme les cuivres. L'audition s'accommode le plus souvent de ces fluctuations qui font somme toute partie de l'exécution musicale (cf. chap. XIV). Cependant certains professionnels (surtout les chanteurs d'opéra) se plaignent du diapason qu'ils accusent de monter continuellement. Nous verrons plus loin quelle lumière peut jeter sur cette question une étude historique.

Il n'est donc pas aisé d'effectuer des mesures précises du diapason d'un orgue ou d'un orchestre, et les résultats obtenus dans un lieu précis à un moment donné doivent obligatoirement intégrer la température sous peine d'être inexploitables. Or, chacun le remarquera, ces indications accompagnent hélas rarement les valeurs citées dans la presse quand elle se fait l'écho de « l'irrésistible ascension du diapason ».

2. Éléments d'histoire du diapason

2.1. Période ancienne

Le concept de hauteur absolue a probablement vu le jour en Chine : un document daté du IIIe siècle av. J.-C. l'attribue au règne de l'empereur mythique Huang Ti (IIIe mill. av. J.-C.) : la référence était alors fournie par des tubes de bambou calibrés, coupés entre deux nœuds et dans lesquels on soufflait ; plus tard, vers le VIe siècle av. J.-C., les tuyaux furent remplacés par des cloches de bronze. Quand une dynastie s'écroulait, c'est qu'elle n'était plus en harmonie avec l'Univers, les cloches étaient alors refondues et le diapason changé.

Les conceptions chinoises n'eurent apparemment aucune influence sur l'Occident. La théorie musicale grecque ne semble pas avoir connu de diapason fixe, pas plus que celle du Moyen Âge qui s'en inspire étroitement. D'ailleurs, il n'existe aucun mot grec ou latin pour désigner cette notion. Le terme diapason (du grec διαπασον), si fréquent dans les textes, signifie *octave*.

Des traités médiévaux[1], il ressort qu'une corde de longueur et de masse quelconque était tendue sur un monocorde et servait à établir des proportions auxquelles on attribuait des noms de notes, de hauteur absolue par conséquent variable. Même absence de précision avec les tuyaux d'orgues :

> « *Gravis C, quæ est prima fistula, longitudo ponitur ad placitum* »[2] [le do grave, qui est le premier tuyau, aura une longueur quelconque] ;
>
> «*Primum fistulam tantæ longitudinis ac latitudinis delibera, quantum mediocritas cum arbitrio doceat* »[3] [choisissez pour le premier tuyau la longueur et le diamètre que vous voudrez, c'est votre sens de la mesure (*mediocritas*) autant que votre bon plaisir qui vous guidera].

La situation demeure encore la même jusqu'au XVIe siècle. Ainsi Philibert Jambe de Fer propose-t-il pour accorder le violon de tendre la corde la plus grave (sol) « *aussi fort qu'il se pourra* » et d'accorder ensuite les autres cordes en quintes justes[4]. Il est clair que cette méthode implique l'absence de diapason.

Mais, dès la fin du XVIe siècle, avec la constitution d'ensembles instrumentaux par familles et les premiers orchestres, peut-être également avec la diffusion croissante de la musique imprimée, se créent progressivement des usages locaux, certes encore largement variables d'une ville à l'autre. Avant cette époque, grande était la difficulté de jouer ensemble, et les instruments se regroupaient plus par possibilités d'accord que par affinités naturelles ; c'est ce qui explique le caractère parfois hétéroclite des formations dont témoigne l'iconographie.

La référence est donnée par l'orgue. Il est normal, puisqu'on ne sait pas encore mesurer la fréquence, d'utiliser comme étalon un tuyau de longueur connue : l'*ut* correspondait alors à l'unité métrique, le *pied*. Mais cette unité n'est pas la même partout. En voici quelques valeurs par ordre croissant de longueur, donc par ordre décroissant de fréquence :

SAXE	:	28,32 cm
HOLLANDE	:	28,40
WÜRTEMBERG	:	28,65
BAVIÈRE	:	29,19
BADE	:	30,00
ANGLETERRE	:	30,48
PRUSSE	:	31,39

[1] Cf. par exemple W. Odington, *De speculatione musicæ* ; pseudo S. Tunstede, *Quatuor principalia musicæ* ; Jacques de Liège, *Speculum Musicæ*.

[2] Pseudo Odon de Cluny, *Intronarium*, Xe siècle, in M. Gerbert, *Scriptores ecclesiastici de musica sacra potissimum*, rééd. facs. Hildersheim, 1963, I, p. 303.

[3] Aribo, *De Musica*, XIe siècle, in J. Smits van Waesberghe, *Corpus Scriptorum de Musica*, 1951, § 45.

[4] Ph. Jambe de Fer, *Épitome musical des tons, sons et accords (...)* , Lyon, 1556.

AUTRICHE	:	31,61
FRANCE	:	32,48
ITALIE	:	35,57

Il est possible, grâce à ces indications, de reconstituer l'écart entre les différents diapasons. Par exemple :

SAXE-BAVIÈRE	= 52 cents
SAXE-ANGLETERRE	= 127 cents
SAXE-FRANCE	= 237 cents
SAXE-ITALIE	= 395 cents

Le diapason bavarois était plus bas d'un quart de ton que le saxon — le plus élevé, et l'italien d'une tierce majeure, ce qui est d'ailleurs conforme aux observations de Prætorius.

Afin de rendre ces chiffres plus parlants, fixons arbitrairement le pied anglais (dont la taille est moyenne par rapport aux autres) à 440 Hz : dans ce cas, le diapason en Saxe se serait trouvé à 473 Hz (entre *si* et *sib*), en France à 413 Hz (soit *sol#*) et en Italie à 377 Hz (environ *fa#*). L'écart entre ces valeurs extrêmes est à peu près celui que l'on retrouve en examinant les instruments à vent conservés dans les divers musées d'Europe.

2.2. Période moderne

À partir du XVIII^{e} siècle, les informations sont plus nombreuses, mais concordent néanmoins sur un point : la hauteur du diapason est encore largement dispersée.

L'invention de l'instrument diapason permet des appréciations plus précises. Appelé *choriste* à l'origine — trahissant ainsi sa destination —, il se présente comme un chalumeau à hauteur fixe, ou d'un corps de flûte muni d'un piston coulissant, confirmant la pluralité des références. L'invention du diapason à fourche, système le plus stable et insensible aux variations normales de température, attribuée à l'Anglais John Shore en 1711 par la plupart des dictionnaires, est sans doute plus tardive et ne date probablement que du début du XIX^{e} siècle.

Dès 1700, l'acousticien Joseph Sauveur parvient à mesurer la fréquence d'un son par la méthode des battements : il trouve 405 Hz pour le *la* du Grand Opéra de Paris, soit 3/4 de ton de moins que notre la_3 actuel. Mais les relevés sont encore imprécis, sporadiques, et ne tiennent pas compte de la température.

Ce qui est en revanche certain et a certainement prêté à confusion, c'est la coexistence, dans une même ville, de plusieurs références selon la destination. En France, par exemple, les textes mentionnent souvent le *ton du Chœur*, le *ton de la Chapelle* et le *ton de l'Opéra*. Certains choristes à piston, bien conservés, comportent effectivement sur leur corps trois repères gravés correspondant à ces trois diapasons. Le ton du Chœur est généralement le plus bas, et celui de l'Opéra le plus haut (ce qui est logique, puisque destiné à des chanteurs professionnels). Cet usage est ancien, et en 1541 déjà, le facteur Jean Bondifer proposait

> d'« antoner lesdites orgues [de la Collégiale Sainte-Maxe] en bas tons selon qu'il sera de besoing en sorte que les chantres puissent aisément chanter et convenir avec lesdites orgues. »[1]

Cet usage est cependant loin de prévaloir partout et tout le temps, et il existe des cas contraires (cf. *Dictionnaire de Musique*, art. « ton »), où Rousseau constate :

> « Peut-être, depuis qu'il existe de la musique, n'a-t-on jamais concerté deux fois sur le même ton. »

[1] Cité par P. Berthier, *Musique et Liturgie*, Paris, 1951.

En Allemagne, il n'est pas rare que les orgues soient accordés plus hauts que les orchestres. J.-S. Bach jouait sur de tels instruments, réglés presque un ton plus haut que le *la* actuel. Le matériel autographe de certaines cantates (BWV 152, 161, 162, 182, 185, notamment) le prouve, où orgue et orchestre ne sont pas écrits dans la même tonalité.

Il est donc inexact d'affirmer que le diapason ancien était systématiquement plus bas que le nôtre. D'abord inexistant, il s'est progressivement constitué en une large fourchette dont les limites sont approximativement le *fa* et le *si* actuels. Ce n'est qu'au XIX^{e} siècle qu'apparurent les véritables tentatives de standardisation.

3. La codification du diapason

C'est une démarche totalement nouvelle. Au lieu de se borner à constater les usages établis et à s'aligner dessus, une norme va être définie, qui sera entérinée par les Pouvoirs publics et imposée aux praticiens.

Que s'est-il passé ? Pourquoi un tel changement d'état d'esprit ? Certains musiciens ou organismes commencent à se plaindre de la montée du diapason. Bernard Sarrette, fondateur du Conservatoire de Paris et directeur de 1796 à 1814, s'inquiète du ton utilisé pour les concerts des élèves :

> « Le comité d'enseignement de l'École de musique s'étant aperçu que l'extrême élévation du ton, adopté pour l'exécution des concerts du Conservatoire, gênait la voix des élèves et la mettait en danger d'être forcée, en les entraînant hors de leurs moyens naturels, a jugé qu'il était indispensable de ramener le ton de l'orchestre à un degré plus favorable à la conservation des voix. On a comparé le diapason des orchestres existants à Paris, et l'on a pris un terme moyen entre celui du théâtre de l'Académie impériale de musique, et celui de l'Opéra-Buffa, de la chapelle de S. M., et des exercices des élèves du Conservatoire. M. le Directeur a, en conséquence, arrêté que le diapason choisi par le Comité serait dorénavant mis en usage au Conservatoire. »[1]

Compte tenu de l'imprécision des relevés (cf. supra), il est difficile de juger du bien-fondé de ces plaintes. Il semble toutefois qu'entre 1700 et 1850, le diapason ait monté à Paris de 405 à 450 Hz, c'est-à-dire environ d'un ton. Mais encore une fois, ces chiffres ne sont qu'indicatifs et ne concernent pas toujours les mêmes salles de concert ni les mêmes orchestres.

L'idée d'une codification gagne cependant du terrain, et une première Commission internationale voit le jour en 1834 à Stuttgart : le physicien Scheibler y préconise l'adoption du la_3 à 440 Hz. Cette recommandation ne fut suivie d'aucun effet, et resta lettre morte auprès des musiciens.

3.1. La commission Lissajous

La réunion de Stuttgart avait été insuffisamment préparée. L'idée est reprise en France, mais avec une meilleure organisation. Une Commission impériale est créée à cet effet, par arrêté ministériel du 17 juillet 1858. Elle se compose de treize membres : quatre administrateurs, sept musiciens (Auber, Berlioz, Halévy, Meyerbeer, Rossini, Thomas, le général Mellinet pour les musiques militaires) et deux physiciens, Desprez et Lissajous.

La Commission fit une enquête dans toute l'Europe, en demandant aux grandes villes d'envoyer un diapason à fourche — donc un instrument très stable — correspondant à l'usage en vigueur. Cette collection se trouve actuellement rassemblée au Musée du Conservatoire National de Musique de Paris. L'étude de ces précieux instruments est révélatrice, et donne pour la première fois une idée précise de la hauteur du *la* dans les principaux centres européens.

---

[1] Notice du 11 décembre 1812, publiée par C. Pierre, *Le Conservatoire National de Musique et de Déclamation*, Paris, 1900, p. 911.

En voici un aperçu, du plus grave au plus aigu, d'après les relevés de Lissajous (confirmés par des mesures plus récentes) :

LONDRES N° 1[1]	434 Hz
CARLSRUHE	435
TOULOUSE (Conservatoire)	437
DRESDEN	441
TOULOUSE (Grand Théâtre)	442,5
BORDEAUX	443
STUTTGART	443
GOTHA	443,2
BRUNSWICK	443,5
WEIMAR	444,7
WURTEMBERG	444,7
TURIN	444,7
PESTH	446
LA HAYE	446,2
MARSEILLE	447
PARIS (Grand Opéra)	448
MUNICH	448,1
LEIPZIG	448,7
PRAGUE	449,7
ST. PÉTERSBOURG	451,5
BERLIN	451,5
LILLE	452
LONDRES N° 2	452,5
LONDRES N° 3	455,5
BRUXELLES (Musique des gindes)	455,5

La Commission rend son rapport le 1er février 1859, rédigé par Halévy. Dans la première partie, celui-ci constate la montée du diapason depuis plusieurs années, et en recherche les raisons qu'il attribue à une cause psychophysiologique (il le dit en d'autres termes) : les sons légèrement haussés paraissent plus brillants, et il en rejette la responsabilité sur les facteurs d'instruments à vent.

La deuxième partie est consacrée à l'analyse et au relevé des fréquences des diapasons reçus :

1re constatation : l'écart le plus grand — observé entre Londres n° 1 et Bruxelles — représente moins d'un demi-ton tempéré (84 cents) ;

2e constatation : « *la France compte à ses deux extrémités un des diapasons les plus élevés, celui de Lille, un des diapasons les plus graves, celui de l'École de Toulouse* »[2].

Le rapporteur présente ses conclusions dans la troisième partie : il faut abaisser le diapason, et lui donner une valeur moyenne par rapport aux usages en vigueur. Mais contrairement à cette profession de foi tout à fait raisonnable, la Commission préconise le la_3 à 435 Hz pour une température de 18 °C, s'alignant en fait sur le diapason le plus bas d'Europe (Londres n° 1 excepté). Cette prise de position s'explique mal encore aujourd'hui : n'aurait-il pas été plus logique de prendre comme étalon la véritable moyenne d'alors, soit 444 Hz ? En outre, une baisse aussi drastique avait-elle des chances de succès à long terme ?

Quoi qu'il en soit, cette valeur devint légale en France, par deux arrêtés ministériels pris au nom de l'Empereur, datés du 16 février et du 31 mai 1859. Ce dernier stipule (article 1 et 3) qu'un diapason étalon « en acier trempé, à branches parallèles (…) revêtu d'un poinçon de vérification

[1] Les instruments londoniens correspondent respectivement au diapason servant à accorder les pianos destinés à l'accompagnement de la musique vocale, à accorder les pianos destinés à la musique instrumentale, et à la *Philharmonic Society*.

[2] En réalité un écart de 58 cents, soit plus d'un quart de ton.

ovale de 2 mm de largeur sur 2 mm et demi de hauteur représentant une lyre avec deux lettres D et N (diapason normal) » soit déposé au Conservatoire Impérial de Musique et de Déclamation.

3.2. La Conférence internationale de Vienne

La décision de Paris fut généralement bien accueillie en Europe, surtout en Allemagne (qui ne l'adopta cependant pas tout de suite), et les autorités politiques et scientifiques françaises furent félicitées pour cette initiative sans précédent.

La Grande-Bretagne ne suivit pas ce mouvement, par suite d'une invraisemblable série d'erreurs dues à un « expert » nommé J.-H. Griesbach, erreurs qui firent sentir leurs conséquences pendant plus de quarante ans[1].

Afin qu'une telle démarche puisse s'étendre, une nouvelle réunion — cette fois à caractère international — se tint à Vienne en 1885. Les conclusions de Paris, ainsi que les procédures d'étalonnage, furent adoptées sans modifications, et le *la*$_3$ à 435 Hz s'imposa à l'Europe musicale, officialisé par voie législative. Toutefois, d'autres résolutions vinrent compléter les dispositions adoptées en 1859, notamment l'idée de remplacer, pour l'accord des instruments de l'orchestre symphonique, le hautbois par un diapason à fourche mis en vibration par le courant électrique. Cette idée ne fut pas mise en pratique (et ne l'est toujours pas !), mais apparaît bien moderne pour l'époque.

Cette nouvelle norme se généralisa dans un premier temps, plus ou moins vite selon les pays ; l'Angleterre, qui ne participait pas à la Conférence de Vienne pour les raisons évoquées plus haut, et usait le plus souvent de diapasons très élevés, se montra évidemment la plus réticente.

3.3. Le diapason actuel

La baisse avait été trop brutale en 1859 et en 1885. Depuis, le diapason n'a cessé de remonter, plus difficilement il est vrai, moins rapidement, puisque sa fréquence est en principe garantie par la loi. En 1938, il se situait à 440 Hz pour les orchestres parisiens et la radio allemande *Deutschlandsender*, à 442 pour les pianos de la Radiodiffusion française ; d'autres mesures font état de chiffres très élevés mais ne tiennent pas toujours compte de la température : 445 aux États-Unis, 450 en Angleterre, 461 en Autriche et jusqu'à 467 à Prague, soit *sib*[2].

Certaines réactions sont spectaculaires : Adolf Hitler interdit en octobre 1938 tout diapason autre que 435 sur le territoire du Reich. Le diapason est vraiment une affaire d'État !

Une nouvelle réunion est jugée nécessaire, elle se tient à Londres les 11 et 12 mai 1939, au siège de l'ISO[3] et ne comprend que des ingénieurs et des techniciens (Pierre Schaeffer représente la France). S'appuyant sur des mesures effectuées d'après des émissions de radio, la commission propose la normalisation du *la* à 440 Hz, exactement comme à Stuttgart en 1834… Puis survient la guerre, et cette recommandation est oubliée.

Dès la fin des hostilités, le problème se pose à nouveau, et l'idée est lancée en 1952 d'une vaste consultation à l'échelle européenne, un véritable référendum, mais s'adressant uniquement aux spécialistes. L'année suivante, en 1953, le Comité d'acoustique de l'*Organisation Internationale de Normalisation* tient son congrès à Londres une nouvelle fois, et, reprenant les conclusions de 1939, décide de fixer le diapason à 440 Hz pour une température de 20 °C. En France, le Président du Conseil entérine cette décision par un décret signé quelques semaines plus tard, et c'est encore à ce jour la valeur légale du *la*$_3$.

---

[1] L'exposé de ces faits dépasse le cadre de ce cours, mais ce point d'histoire est parfaitement exposé dans l'article de Ll.S. Lloyd «Pitch, Standard», *Grove Dictionary of Music and Musicians*, VI, Londres, 1954.

[2] Annales de l'IRCAT (Institut de Recherche et Coordination Acoustique et Technique), n° 1, 1939.

[3] *Institut for Standardization Organisation.*

4. Conclusion

Quelques remarques s'imposent au terme de cette étude. D'abord concernant l'ascension continuelle du diapason. A l'heure actuelle, toutes les mesures le prouvent, le diapason a remonté, et se stabilise environ à 444 Hz : c'est exactement la moyenne à laquelle il se trouvait… en 1858.

Quant aux fluctuations de hauteur, elles sont bien inférieures à celles que l'on enregistrait aux XVIII^{e} et XIX^{e} siècle : la moyenne statistique (qui concerne le monde occidental tout entier) est à peine supérieure de 16 cents à la norme légale.

Le diapason n'augmente pas de façon continue, mais semble se stabiliser (plus ou moins) *au-dessus* de sa norme fixée. Autrefois, en l'absence de référence normative, on comprend que la montée ait pu être progressive, par ajustements successifs au-dessus de l'ajustement précédent.

Enfin, il ne faut jamais oublier que le concept de normalisation est récent — moins de deux siècles — et se référer au diapason d'une œuvre ancienne est une entreprise délicate, supposant des recherches sur les usages locaux à une époque précise ; cela n'a de toute façon guère de signification avant le XVII^{e} siècle. La pratique d'un « diapason baroque » fixe et plus bas que le nôtre (souvent 415 Hz) serait à cet égard un double contresens, par anachronisme et par méconnaissance de la largeur de la fourchette autrefois utilisée, si le but avoué n'était la nécessité d'une hauteur de référence tant pour la construction des instruments que pour pratiquer la musique d'ensemble. Cela ne veut pas dire qu'il faille jouer les œuvres anciennes au diapason actuel, mais que la réalité historique est d'une complexité qui la rend rebelle aux systèmes un peu trop simples.

CHAPITRE XVII

LA SENSATION DE TIMBRE

Des quatre paramètres qualifiant un son, la hauteur, l'intensité, la durée et le timbre, le dernier est celui qui se laisse le moins aisément cerner, comme en témoignent les définitions embarrassées des dictionnaires usuels : « qualité d'un son qui permet de le différencier de tous les autres sons ayant la même hauteur et la même intensité »[1] ; « qualité subjective d'un son qui fait que celui-ci paraît agréable ou désagréable à l'oreille »[2]. Il n'existe d'ailleurs pas, comme pour les trois autres paramètres, d'unités acoustiques susceptibles de le mesurer, et à dire vrai la notion même de timbre est étrangère à la physique, pour laquelle la fréquence et l'intensité des composants en présence suffisent à caractériser complètement un spectre sonore. Ce point de vue, sans doute tout à fait valable sur le plan théorique, ne correspond pourtant pas à la réalité perceptive. Bien au contraire, le vocabulaire des musiciens est d'une grande richesse dans ce domaine, et reflète une sensibilité auditive aiguë à cette dimension sonore.

Pour cette raison, l'étude du timbre reste largement empirique et orientée vers la psychophysiologie auditive, puisque c'est bien d'une sensation qu'il s'agit. Elle est principalement fonction de trois éléments : la composition du spectre sonore, le « corps du son » en quelque sorte ; les phases d'établissement et d'extinction du son, c'est-à-dire la partie la plus dynamique et instable du spectre ; enfin, l'environnement, les conditions d'écoute, et d'une façon générale les canaux de transmission et de diffusion qui participent eux aussi à l'élaboration de la sensation de timbre.

1. La composition spectrale

En première analyse, le timbre est fonction de la composition spectrale ; c'est même souvent — bien à tort — le seul facteur retenu pour expliquer sa formation. La sensation de timbre varie avec le type de spectre, harmonique, à partiels ou aléatoire.

1.1. Spectres harmoniques

Les vocables qualifiant le timbre, nous l'avons dit, sont nombreux et imagés. Il est possible d'observer, avec le sonagraphe, la structure interne d'un son, et d'établir ainsi une correspondance entre qualificatif et composition spectrale (fig. 71). Les quatre premiers sons ne possèdent qu'un seul composant et sont donc sinusoïdaux. Dans ce cas extrême, le timbre varie avec l'intensité et la fréquence ; il évoque également des phonèmes : *m* ou *n* en dessous de 130 Hz, successivement *ou, o, a, é, i* entre do_3 et do_7 environ (262-4186 Hz) et *f* puis *s* au-dessus de 8000 Hz.

Les sons e et g sont pauvres en harmoniques mais leur énergie est surtout située dans le grave et décroît régulièrement avec le rang des composants : e sonne comme certains bourdons d'orgue, tandis que g est typique de la flûte traversière (dans le registre grave). Le son f ne présente aucun formant et perd ainsi toute connotation de « douceur ».

Les exemples h et i sont tous deux riches en harmoniques mais perçus différemment du fait de la répartition de l'énergie : un spectre homogène et régulier, sans formant, paraît souvent « maigre »

[1] *Science de la Musique*, II, Bordas, 1976.
[2] *Encyclopédie de la Musique*, III, Fasquelle, 1961.

aux oreilles occidentales. Un tel timbre est produit par des instruments dont la corde vibrante est longue par rapport au volume de la caisse de résonance, comme les vièles extrême-orientales (*hou-k'in* chinois, *dàn nhi* vietnamien). Le son i n'est autre qu'un spectre en dents de scie produit par des oscillations de relaxation.

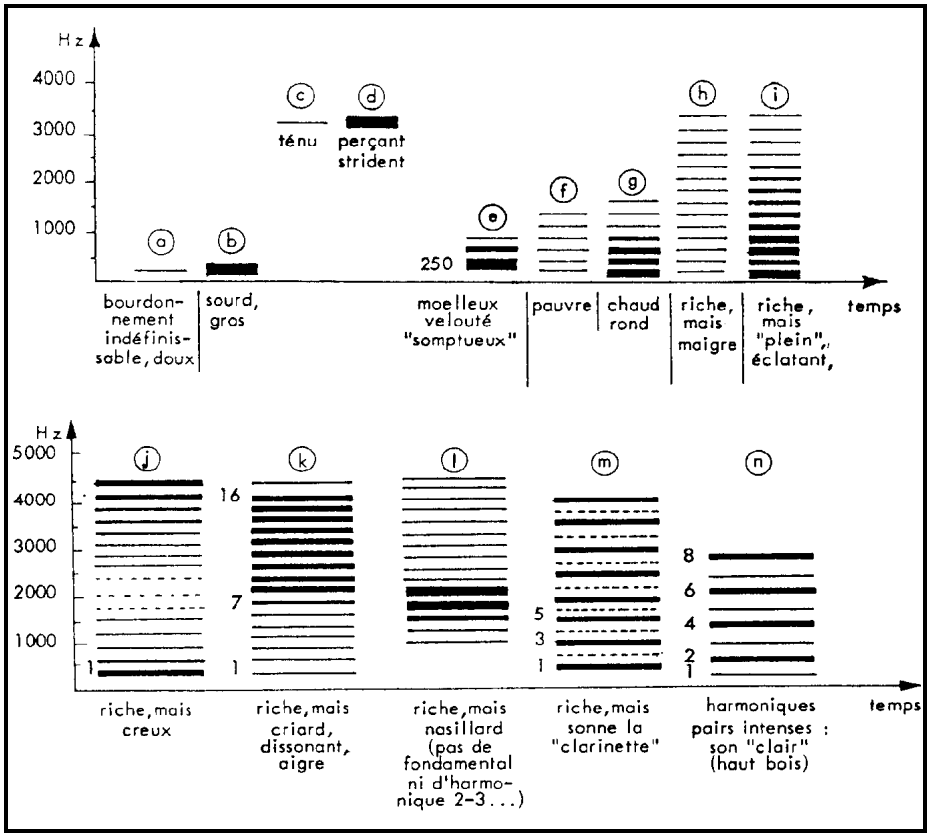


Fig. 71 : timbre et composition spectrale

Le son j présente une bande de réjection entre 1500 et 2500 Hz ; ces « trous » sont provoqués par les sourdines des cuivres (trompette bouchée). Un formant placé très haut, avec peu d'énergie dans le grave, (son k) renforce les dissonances des harmoniques élevés par rapport au fondamental : de tels effets sont volontairement créés avec certains luths indiens (*tanpura* ou *rudravina*). Un formant situé plus bas, dans une zone plus consonante, crée un nasillement caractéristique de certains jeux d'anches à l'orgue, du registre grave de la clarinette (chalumeau) ou encore du basson, surtout si les premiers harmoniques émergent faiblement.

Les deux derniers exemples présentent des configurations plus ou moins régulières : le son m, riche en harmoniques de rangs impairs (médium de la clarinette), est le produit d'oscillations rectangulaires, et la clarté du spectre du hautbois (ex. n) provient d'une nette prédominance d'harmoniques de rangs pairs engendrés par des oscillations triangulaires.

Ces sonagrammes sont schématiques et la réalité est évidemment beaucoup plus diverse et complexe. Un même type d'instrument ne présente pas un timbre complètement homogène sur toute son étendue, et l'instrumentiste joue un rôle déterminant dans le résultat final.

Il ressort néanmoins de ces exemples que le timbre des spectres harmoniques est fonction de quatre variables principales :

1. le nombre de composants
2. leur répartition dans le spectre
3. l'intensité relative des harmoniques entre eux
4. leur degré de consonance avec le fondamental

Ces variables servent de base à l'analyse spectrale : déterminer la plus ou moins grande **richesse** du son, détecter la présence éventuelle de **bandes de réjection**, mettre en évidence les **formants** et leur intensité, évaluer leur **emplacement** dans le spectre et leur éloignement par rapport au fondamental.

1.2. Spectres à partiels

La perception du timbre n'est pas très différente avec les spectres à partiels. Leur **degré d'inharmonicité**, qui joue un rôle déterminant dans la sensation de hauteur, peut intervenir ici comme une cinquième variable venant s'ajouter aux quatre précédentes.

Les spectres à inharmonicité faible ou systématique, c'est-à-dire dans lesquels l'écart entre deux partiels consécutifs augmente régulièrement (cf. fig. 44), peuvent être assimilés au régime harmonique. Pour ceux dont l'inharmonicité est forte, le timbre est largement influencé par l'intensité des formants et les rapports d'intervalles entre les partiels dominants (points 3 et 4).

1.3. Spectres aléatoires

Il s'agit des diverses formes de bruits, qui contiennent un grand nombre de composants répartis et évoluant aléatoirement au sein du spectre (cf. fig. 44). Comme il n'existe aucune relation perceptible entre les éléments constitutifs de l'ensemble, l'oreille ne distingue plus de hauteur précise, mais une sensation de registre.

Cela implique des conséquences sur le timbre, qui ne peut dès lors être appréhendé comme un spectre de raies. C'est pourquoi d'autres critères d'analyse doivent être retenus :

1. largeur du spectre
2. durée
3. coloration
4. densité

La **largeur** (ou largeur de bande) d'un spectre aléatoire est son étendue en fréquence, du grave à l'aigu. L'interférence entre hauteur et timbre est ici particulièrement évidente : augmenter la hauteur d'un *chhh* le transforme en *ssss*.

La **durée** modifie elle aussi radicalement la sensation de timbre. La perception d'un *bruit blanc*, qui contient aléatoirement toutes les fréquences, est différente selon que le spectre est très bref ou plus long : l'allongement temporel des chocs, claquements et explosions les transforme en bruit d'écoulement d'air comprimé.

La **coloration** et la **densité** sont fonction de l'énergie acoustique et de sa répartition dans le spectre. Dans un *bruit rose*, par exemple, l'énergie est également répartie dans chacune des octaves du spectre. La coloration peut également agir comme un formant modifiant le timbre en fonction de son (ou ses) emplacements : la densité permet d'apprécier ou de mesurer son amplitude.

Les termes — presque péjoratifs — utilisés pour qualifier de tels sons, bruits ou spectres aléatoires, ne doivent pas faire oublier qu'il s'agit d'éléments fondamentaux pour la perception musicale, parce que constituant l'essentiel des phénomènes transitoires.

2. Les transitoires

On appelle transitoires les phases d'établissement (attaque) et d'extinction du son, c'est-à-dire précédant et suivant le corps du son, qui en est la partie la plus stable (mais néanmoins sujette elle aussi à d'importantes fluctuations).

L'acoustique classique a souvent négligé les aspects les plus évolutifs du son dans sa recherche de la genèse du timbre. Cela s'explique certainement par la grande complexité de phénomènes qui durent parfois moins d'une milliseconde, et donc très difficiles à isoler et à mesurer.

Nous savons aujourd'hui que l'action des transitoires est déterminante dans la perception du timbre, comme l'a démontré la psychoacoustique expérimentale. Par exemple, un son de harpe ou de guitare enregistré sur bande magnétique et lu à l'envers est rendu méconnaissable. Il conserve

pourtant son intégrité sur le plan spectral (nombre de composants, situation et importance des formants, etc.), mais subit une transformation sur le plan dynamique : attaque douce et progressive, fin brusque et sèche, du fait de l'inversion des transitoires d'attaque et d'extinction.

De même, si des accords de piano sont amputés, sur un enregistrement, des quelques millisecondes que dure leur attaque et si, dans le même temps, l'extinction est « corrigée » artificiellement par un relèvement progressif du niveau au potentiomètre d'entrée, de façon à obtenir une intensité à peu près constante pendant la durée du son, rien n'est modifié, là non plus, pour la composition spectrale, et seuls les transitoires sont manipulés : cela suffit à changer radicalement le timbre du piano, au point de le faire ressembler à de l'harmonium, ou même à du violoncelle…

Une dernière expérience, riche d'enseignement, tout comme les précédentes facile à réaliser avec un magnétophone à bobines : remplacer, au début d'une note de violon durant environ une seconde, le coup d'archet par une attaque de flûte traversière. À l'audition d'un tel « monstre », l'oreille est désemparée (on la comprend), mais identifie presque toujours un instrument à vent (curieusement à anche), en tout cas pratiquement jamais un instrument à archet. Cela signifie que notre système auditif, ayant le choix entre les quelques millisecondes du transitoire de la flûte et la seconde entière du son de violon, penche immanquablement vers la famille des vents, c'est-à-dire privilégie le mode d'attaque plutôt que le corps sonore.

Sur le plan perceptif, notre cerveau traite les données en temps réel, et tout se passe comme si les sons étaient triés à l'entrée de la mémoire immédiate par leur début : dans ce cas, le dernier exemple serait mal classé par rapport au timbre du violon, et une fois rangé au milieu des sons d'instruments à vent, ne serait plus identifiable.

2.1. Les transitoires d'attaque

Attaquer un son consiste à communiquer en un temps très bref une certaine quantité d'énergie potentielle à un corps sonore : celui-ci devient alors le siège d'un grand nombre de phénomènes vibratoires complexes, concrètement des partiels à la durée de vie très courte, jusqu'à ce que le corps trouve son régime propre, et dissipe dans le temps l'énergie potentielle reçue dans le cas de vibrations libres, ou au contraire se soumette à l'excitateur en s'accordant sur lui dans le cas de vibrations forcées (cf. chap. V § 3).

2.1.1. Composante de bruit

Les transitoires d'attaque présentent des formes spectrographiques variées, caractérisées par une proportion plus ou moins importante de bruit qui trahit le mode d'excitation de l'instrument (fig. 72) :

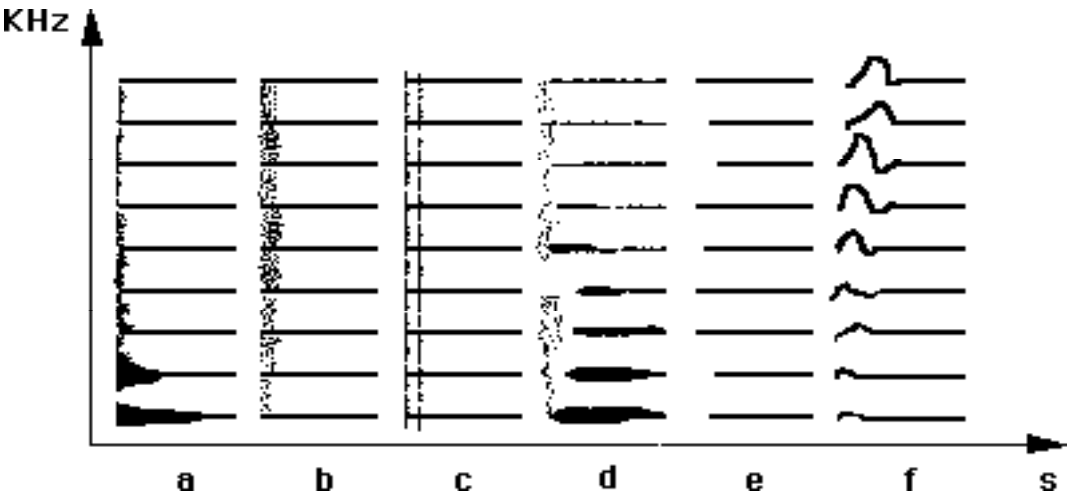


Fig. 72 : transitoires d'attaque : proportion de bruit

Le transitoire peut être un choc très bref, comme dans le piano (a) ou les percussions. Le frottement des archets sur les cordes provoque un bruit blanc (violon, b). Deux légers chocs très rapprochés indiquent un coup de plectre sur des doubles cordes (mandoline, c). Le bruit de souffle, typique des instruments à biseau, se traduit par un spectre aléatoire de faible densité et inégalement distribué (flûte, d) ; on remarque également l'intensité croissante de certains harmoniques, donnant une forme dite « en fuseau ». Le transitoire peut être purement temporel (cf. infra) et ne comporter aucun bruit d'attaque, comme avec les anches battantes (clarinette, e). Avec les instruments à anches membraneuses (trompe de chasse, f), il prend la forme d'une déviation rapide des raies harmoniques vers l'aigu, qui produit une fluctuation de hauteur à la limite de l'audibilité mais tout à fait caractéristique.

2.1.2. Composante temporelle

Les transitoires d'attaque ne se réduisent pas uniquement à une quantité de bruit, et leur dimension temporelle doit également être analysée. Elle se traduit d'abord par une durée totale, comprise entre l'apparition du premier composant et celle du dernier. À l'intérieur de cette durée, qui varie dans des proportions importantes, l'ordre d'apparition des composants est significatif :

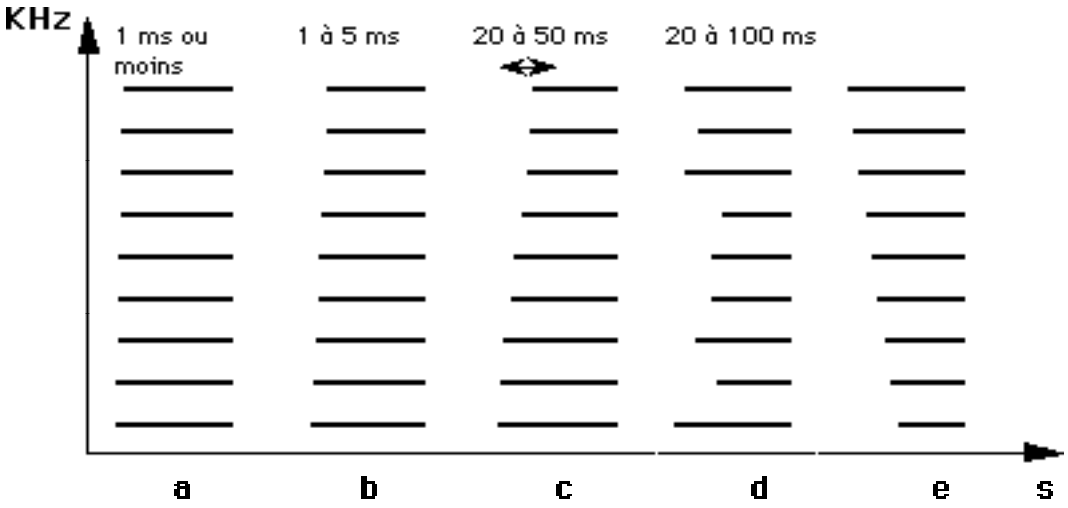


Fig. 73 : transitoires d'attaque : durée

La figure 73 schématise quelques allures temporelles typiques. Avec les percussions, les cordes frappées ou pincées, tous les composants arrivent en même temps (ou presque) et la durée du transitoire est parfois inférieure à 1 milliseconde (clavecin, a). Les harmoniques des cuivres apparaissent progressivement, du grave à l'aigu avec une allure le plus souvent exponentielle ; la durée varie largement et dépend aussi bien du type d'instrument que du style d'attaque (trompette, b ; cor, c). L'ordre d'arrivée peut être irrégulier et prendre un temps relativement long, comme ici pour la flûte (d), mais là encore tout dépend du mode d'attaque : un « coup de langue » raccourcit considérablement le transitoire, une articulation *legato* l'allonge. Enfin, les orgues électroniques font parfois apparaître le grave avant l'aigu (e), mais cela dépend du type de synthèse, du système de diffusion et de la qualité des haut-parleurs.

2.1.3. Composante d'amplitude

Les harmoniques ou les partiels présentent non seulement des décalages temporels entre eux, mais au cours de leur apparition, leur amplitude peut varier notablement. La figure 74 montre ainsi les courbes d'établissement des cinq premiers composants pour un fa_3 de trompette et un la_3 de violon. L'évolution des harmoniques semble totalement aléatoire, et n'obéir à aucune loi connue (cf. par exemple le fondamental ou l'harmonique 3 de la trompette).

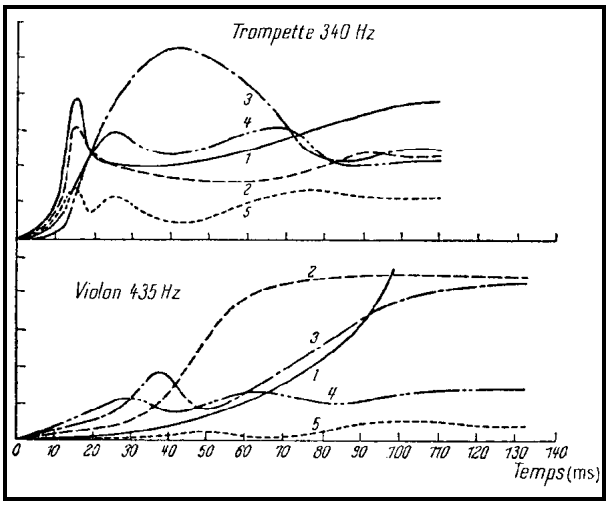


Fig. 74 : transitoires d'attaque : évolution des composants

2.2. Les transitoires d'extinction

Par rapport à l'attaque, l'extinction d'un son comporte peu de bruit ajouté, c'est-à-dire de partiels étrangers au régime stationnaire. En revanche, sa durée varie dans des proportions considérables, allant de quelques millisecondes à plusieurs secondes selon le type d'instrument ou la technique de jeu (cf. le piano joué *staccato* ou avec la pédale). Il est possible là aussi d'observer des formes caractéristiques d'extinction du son, progressives ou aléatoires, sur des durées plus ou moins longues.

Sans être négligeables, les transitoires d'extinction n'ont pas la même importance que les transitoires d'attaque. Cela tient à leur position à la fin du son, la sensation de timbre est déjà constituée quand ils apparaissent, ce qui réduit évidemment leur influence.

Il est possible, cependant, de considérer les sons percussifs comme une juxtaposition de deux transitoires sans régime stationnaire, l'extinction s'enchaînant directement à l'attaque. Dans une telle conception, la phase finale retrouve toute son importance.

Si les transitoires sont déterminants dans l'élaboration de la sensation de timbre musical, il est un domaine où leur action est plus fondamentale encore : dans le langage parlé, ils constituent l'essentiel de l'information sémantique, et sous la forme des consonnes associées aux voyelles, la diversité de leur structure acoustique est pleinement exploitée.

3. Les composantes spatiales

Un son musical n'est pas un objet abstrait que l'on peut isoler pour l'étudier plus facilement. Il se propage dans un environnement qui le modifie et lui impose des distorsions. Il faut donc examiner les paramètres extérieurs au son, susceptibles d'altérer ou de transformer la perception du timbre, c'est-à-dire le résultat final, celui qui rentre effectivement dans les oreilles pour devenir une sensation.

Nous avons déjà étudié (chap. IV) la propagation du son en présence d'obstacles. Rappelons brièvement les deux principaux modes d'action d'une salle sur le timbre.

D'abord par la **réverbération**, qui agit directement sur les transitoires, d'une façon plus ou moins importante selon la valeur du TR. Non seulement la fin d'un son qui se prolonge vient interférer avec le début du suivant, ce qui provoque déjà des modifications appréciables, mais l'attaque aussi subit un allongement temporel de nature à transformer plus subtilement et profondément la sensation de timbre.

La « **couleur** » acoustique de la salle est également un paramètre à ne pas négliger. Tout lieu possède à des degrés divers des résonances propres, liées à des régimes d'ondes stationnaires, qui agissent sur les spectres sonores en déplaçant l'énergie disponible, privilégiant ou pénalisant

certains formants par rapport à d'autres. Les salles de concert possèdent ainsi en propre des ambiances sonores auxquelles sont sensibles les grands concertistes. Les timbres y acquièrent une couleur ou un relief particuliers qui ne conviennent pas nécessairement à tous les types de musique[1].

Quelle que soit la salle, l'acoustique n'y est pas strictement identique partout, ce qui pose des problèmes aux musiciens attentifs aux réglages de la sonorité. La difficulté principale vient cependant de la position même de l'instrumentiste : jouant généralement près de ses oreilles, il ne peut avoir qu'une idée approximative et intuitive de la façon dont les auditeurs vont percevoir le timbre de son instrument et de la part prise par la salle dans la sonorité finale.

[1] Cf. F. Winckel, «Architecture et musique spatiale», *Conférences des Journées d'études du Festival international du Son,* Paris, 1971.

CHAPITRE XVIII

LE BRUIT

1. Le concept de bruit

1.1. Bruit et environnement

Devenu aujourd'hui l'une des formes de pollution les plus préoccupantes, le bruit est un déchet totalement irrécupérable de l'industrie humaine. Responsable direct de plus de 11 % des accidents du travail, il en provoque en réalité beaucoup plus par ses effets secondaires, fatigue, baisse de vigilance, stress, etc. Les experts chiffrent par millions le nombre d'heures perdues par jour à cause du travail mal fait, sans compter le gaspillage de matériel, la détérioration des conditions de travail, l'énervement…

Le bruit n'est certes pas un phénomène nouveau, et apparaît inéluctablement lié à l'activité humaine. Dès l'Antiquité, il est dénoncé avec vigueur :

> « L'homme pauvre, Sparsus, ne peut ni méditer à Rome, ni s'y reposer. Tant de gens vous empêchent d'y vivre ! Le matin ce sont les maîtres d'école ; la nuit, les boulangers, et tout le long du jour, des chaudronniers et leurs marteaux. Ici, c'est le changeur qui passe son temps faire à sonner sur son sale comptoir des pièces frappées à l'effigie de Néron ; là, c'est le batteur de lin d'Espagne qui l'écrase sur la pierre à l'aide d'un fléau poli ; ce sont encore les cris incessants des prêtres de Bellone ; la voix criarde du naufragé portant au cou sa tirelire ; celle du Juif instruit par sa mère à mendier et du marchand d'allumettes aux yeux chassieux. Qui compterait les heures perdues à Rome pour le sommeil dirait le nombre de mains qui frappent sur des bassins de cuivre pour ensorceler la lune… »[1]

De tels témoignages sont nombreux au cours de l'Histoire, et leur analyse montre que la gêne provenait surtout de la voix humaine et des sons d'impacts. Mais comme la musique elle-même, notre environnement sonore a évolué et sa structure spectrale s'est modifiée au fil du temps, particulièrement à l'avènement de l'ère industrielle, avec son cortège de grandes inventions : machine à vapeur puis électricité, automobile et avion, qui assurent la présence du moteur à explosion et du réacteur dans les contrées les plus reculées de notre planète, enregistrement et radiodiffusion qui permettent d'occuper l'espace sonore partout, et tout le temps.

Les sons d'impacts sont toujours nombreux, mais peu à peu s'est installé autour de nous un bruit de fond à caractère continu, en forme de spectre aléatoire riche en basses fréquences, omniprésent, véritable emblème de notre société moderne. Même si nous ne l'entendons pas toujours consciemment il est toujours là, ne cessant de stimuler jour et nuit nos capteurs auditifs et solliciter notre système nerveux.

---

[1] Martial, Ier s. ap. J.-C. Cité par É. Leipp dans *La machine à écouter,* Paris, 1977.

1.2. Définitions physiques

Le bruit peut-il être défini par ses caractéristiques physiques ? Cela a souvent été tenté, récemment encore ; il est alors curieusement décrit en termes de tonie : « son de hauteur indéterminée », ou selon sa nature vibratoire : « son non harmonique », « apériodique », « vibration complexe irrégulière »…

De telles formulations, outre qu'elles englobent les sons de beaucoup d'instruments de musique, notamment les percussions, ne rendent compte que de la forme d'un signal et non de l'effet qu'il produit. Or, en matière de bruit, l'aspect perceptif est essentiel.

1.3. Aspect psychologique du bruit

Un bruit est un *son gênant*. C'est une définition correcte, avec tout ce qu'elle suppose de subjectivité. L'essence bruyante d'un son n'étant pas fonction de sa nature, mais de la façon dont il est reçu, tout signal sonore est susceptible de provoquer une nuisance : il arrive qu'une symphonie de Mozart écoutée le soir dans un appartement soit de la musique sublime d'un côté de la cloison, du bruit insupportable de l'autre.

Dans le même ordre d'idée, un mécanicien qui fait ronfler un moteur gêne certainement ses voisins, mais écoute attentivement un signal qu'il analyse pour effectuer des réglages : vacarme pour les uns, informations utiles pour d'autres ; il est d'ailleurs remarquable, dans cette situation, que le mécanicien appellera sans doute « bruit » un petit événement que le non initié entendra à peine dans le spectre du moteur.

C'est pourquoi le concept de bruit doit être étendu, pour s'appliquer à *toute déformation non souhaitée dans un signal*. Sont donc concernées par cette définition toutes les altérations inévitables dans les systèmes de transmission des messages, comme la distorsion et le bruit de fond générés par chaque maillon de la chaîne.

1.4. Bruit et musique

L'erreur de prétendre réduire le bruit à sa seule forme physique, et d'opposer sa structure à celle du son prétendument musical, apparaît clairement avec l'évolution de la musique contemporaine. Luigi Russolo (1885-1947), peintre italien et membre du mouvement futuriste fondé par Filippo Marinetti, fut le premier à intégrer totalement le bruit à l'œuvre musicale[1]. Pour lui, le bruit est au timbre musical ce que la dissonance est à la consonance sur le plan harmonique, une nécessité, facteur d'évolution. Les bruits ne doivent pas être imités, mais combinés et traités comme un matériau musical à part entière. La musique deviendrait ainsi le reflet esthétique de notre époque dominée par le machinisme, lui-même grand producteur de bruits. Russolo utilisait dans ses concerts différents bruiteurs auxquels il donnait des noms évocateurs : hululeur, crépiteur, bourdonneur, éclateur, croasseur, sibileur, froufrouteur, grondeur, strideur, glouglouteur…

Cette tentative de créer une musique figurative où s'exprimerait « la voix des choses », malgré son succès auprès des Surréalistes, des Dadaïstes et du Groupe des Six, tourna court probablement par suite des difficultés techniques rencontrées à chaque concert : précurseur visionnaire, Russolo n'avait peut-être pas non plus l'étoffe d'un compositeur authentique, capable de transformer une idée originale en une œuvre achevée. Mais son influence fut considérable sur des musiciens comme Edgar Varèse (1883-1965) ou John Cage (1912-1992), et ses conceptions ont favorisé l'éclosion de la musique électronique créée par Herbert Eimert (1897-1972) à Cologne en 1945, et de la musique concrète[2] imaginée à Paris dans les studios de la RTF par Pierre Schaeffer (né en 1910).

---

[1] Cf. son *Arte dei rumori*, Milan, 1913.

[2] D'abord appelée «Concert de bruit», lors de sa première manifestation en octobre 1948, elle ne prit ce nom qu'en 1950.

2. La mesure du bruit

2.1. Les unités de mesure

Un bruit peut-il être mesuré comme n'importe quel autre son ? Certainement pas, et c'est la conséquence de sa nature psychophysiologique : déterminer des niveaux en décibels sans tenir compte de leur sonie est inutile. C'est donc le phone qui doit servir d'unité de mesure.

Mais les appareils de mesure ne peuvent tenir compte de la totalité des lignes isosoniques : par exemple, un son de 60 dB vaut environ 10 Ph à 50 Hz, 20 Ph à 70 Hz, et 50 Ph à 100 Hz (cf. diagramme de Fletcher, chap. XI § 2.2). C'est pourquoi l'étalonnage se limite le plus souvent à trois courbes de réponse, dénommées A, B et C, correspondant respectivement aux courbes isosoniques 40 Ph, 70 Ph, et 100 Ph du diagramme de Fletcher. Les résultats s'expriment en dB(A), dB(B) ou dB(C) selon la courbe utilisée.

2.2. Le sonomètre

Le sonomètre est un appareil portatif muni d'un microphone, d'un amplificateur et d'un système de pondération correspondant aux courbes A, B et C définies ci-dessus. Pour mesurer l'intensité d'un son, on sélectionne sur le sonomètre un circuit de pondération en fonction du niveau approximatif de ce son : A pour les sons faibles ou peu intenses, B pour les intensités moyennes ou C pour les niveaux élevés. L'appareil fournit alors une valeur en dB(A), dB(B) ou dB(C) selon le choix effectué — en réalité une mesure en phones — tenant compte par conséquent de la fréquence du signal.

À l'heure actuelle, on utilise presque exclusivement les dB(A) pour toutes les intensités, parce qu'ils correspondent mieux à la perception subjective. Souvent, dans les médias non spécialisés, des chiffres relatifs au bruit sont cités et exprimés en décibels, sans autre précision : il s'agit alors généralement de dB(A).

Le sonomètre dispose également de plusieurs constantes de temps (généralement deux) pour effectuer ses mesures : une rapide, de 125 millisecondes, appelée *caractéristique F* (comme *fast*) pour suivre avec précision l'évolution d'un son s'il ne varie pas trop vite ; l'autre plus lente, la *caractéristique S* (*slow*), de 1000 millisecondes, pour intégrer des variations trop rapides pour être lues en position *F*.

2.3. Le « thermomètre » du bruit

Il est utile de connaître la valeur en dB(A) d'un certain nombre de bruits de référence, afin d'avoir en tête un ordre de grandeur. Les chiffres suivant sont fournis à titre indicatif, et susceptibles de variations.

Fusée Ariane au décollage	200	
Décollage d'un Boeing à 25 m	140	zone traumatique
Marteau pneumatique	130	
Orchestre rock	120	
Avertisseurs de certaines automobiles	110	zone dangereuse
Scie circulaire à bois	100	
Cyclomoteur	90	
Compartiment de train ou de métro	80	zone de fatigue
Circulation routière moyenne	70	
Magasins	60	

Conversation animée	50	zone de repos diurne
Imprimante matricielle	50	
Rue calme	40	
Studio d'enregistrement	30	limite de repos nocturne
Voix chuchotée	20	

La partie droite du tableau indique les normes légales, mais les spécialistes de l'audition s'accordent à les trouver trop tolérantes et au-dessous des dangers réels.

2.4. Limites de la métrologie

Le sonomètre est utile, surtout pour des relevés comparatifs, par exemple avant et après traitement en cas d'insonorisation d'un local. Mais il reste malgré tout d'un emploi difficile, et les résultats fournis ne sont pas toujours en accord avec les sensations subjectives.

L'étalonnage du sonomètre est simpliste, comparé à l'audition humaine, mais multiplier les circuits de pondération rendrait son utilisation trop compliquée. Plus le son est évolutif, moins le sonomètre est efficace, et l'on sait à quel point les bruits peuvent varier rapidement.

D'autre part, nous ne savons pas bien encore à l'heure actuelle comment s'effectue, dans le système auditif, la sommation des intensités perçues. La méthode adoptée pour les sonomètres ne donne pas de très bons résultats avec les sons complexes, surtout si leurs formes sont assez différentes les unes des autres. Les chocs, impulsions et sons d'impacts, si fréquents avec le bruit, sont également difficiles à mesurer et exigent des constantes de temps de l'ordre de 20 millisecondes, en tout cas bien inférieures à celles dont les sonomètres disposent habituellement.

Dans des cas réels, l'emplacement où effectuer les mesures n'est pas facile à déterminer. Le bruit varie d'un endroit à l'autre, et le point d'émergence maximale n'est pas forcément représentatif de l'ensemble de la zone bruyante. En fin de compte, deux opérateurs n'obtiennent pas toujours le même résultat dans la même situation.

3. La forme du bruit

3.1. Structure des bruits de fond

L'acoustique moderne a accompli de grands progrès depuis qu'elle ne considère plus le bruit seulement sous l'angle quantitatif, mais qu'elle prend en compte sa forme, ainsi que le contexte dans lequel il émerge.

La figure 75 présente neuf bruits de fond typiques auxquels peuvent être assimilés, en pratique, la plupart des cas possibles. Les **bruits blancs** : amorphe (a), du type écoulement d'air comprimé ; granuleux (b) si l'intensité de certains micro-événements est plus importante ; à granulation triangulaire (c) dont la microstructure est perceptible et orientée dans le temps, par exemple pour les bruits de grande circulation ; les **bruits de fond à organisation horizontale ou verticale** : une ou plusieurs bandes formantiques (d, e) à caractère continu, comme avec les avions à réaction, ou combinée à des microstructures (f) ; chocs en rafale sur des matériaux amortis (g) ; **les bruits de fond hétérogènes** : chocs en rafale sur matériaux résonants (h), ou erratiques (i), comme le bruit d'une gare en période d'affluence, composé d'un grand nombre d'éléments différents à caractère aléatoire, trafic, paroles, signaux d'avertissement.

Tous ces bruits peuvent très bien présenter exactement la même intensité en phones ou en décibels, et donc être identiques pour le sonomètre, alors qu'ils sont fortement différenciés par l'oreille. Le niveau de gêne qui en résulte n'est pas équivalent pour toutes les formes, ce dont ne peut rendre compte la métrologie classique. Soulignons au passage la parfaite adaptation de la spectrographie à ce type d'analyse.

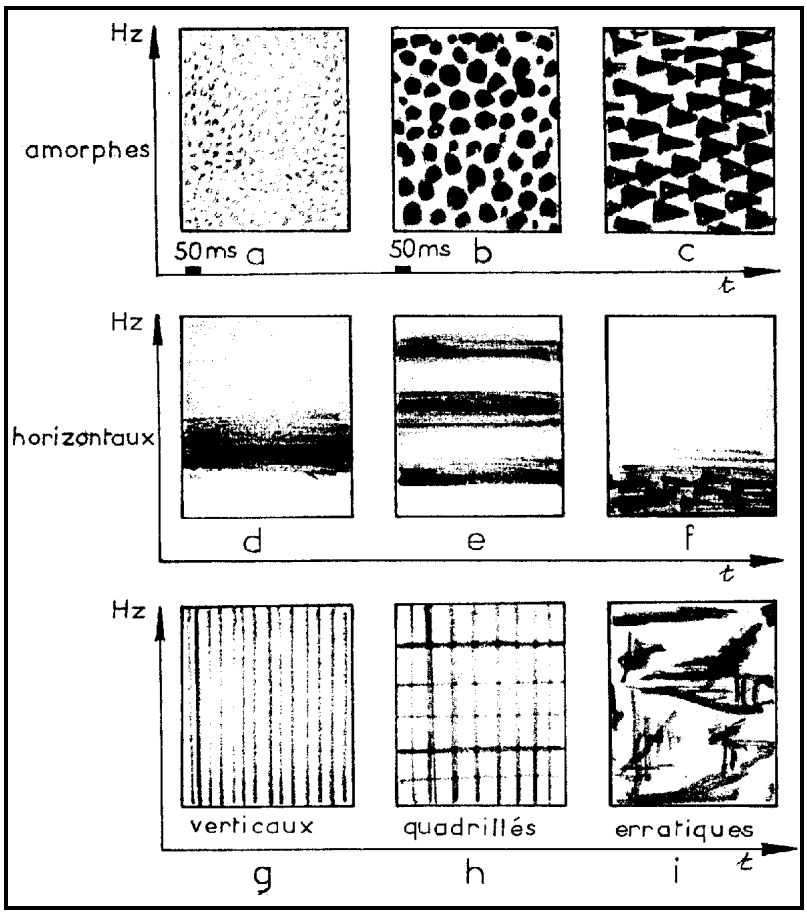


Fig. 75 : différents bruits de fond

3.2. Niveau physique et émergence

Le relevé sonométrique ne décrit donc pas suffisamment la perception humaine. La figure 76 en apporte une preuve supplémentaire particulièrement convaincante. Elle présente le sonagramme d'un bruit de circulation à Paris, dans lequel on distingue le coup de sifflet d'un agent de police. Sur ce spectre, a été calée une courbe de niveau mesurant avec précision l'évolution globale de l'intensité. Les résultats sont spectaculaires : l'événement principal de l'enregistrement, celui qu'on *voit* immédiatement et donc qu'on *entend* le plus distinctement, est le coup de sifflet ; or, rien de ce signal ne transparaît sur la courbe de niveau, tout se passe comme s'il n'existait pas. Cela se comprend aisément : la courbe indique en permanence le niveau des éléments les plus intenses, et dans le cas présent, le bruit de circulation représente une énergie bien supérieure à celle du sifflet.

Ce qui ressort d'une telle expérience, c'est que le système auditif est moins sensible à la puissance sonore totale qu'à la reconnaissance d'une forme originale. Cette constatation permet d'envisager le bruit dans une perspective nouvelle : nous le définirons comme *la perception de l'émergence d'une forme gênante sur un fond par effet de contraste*.

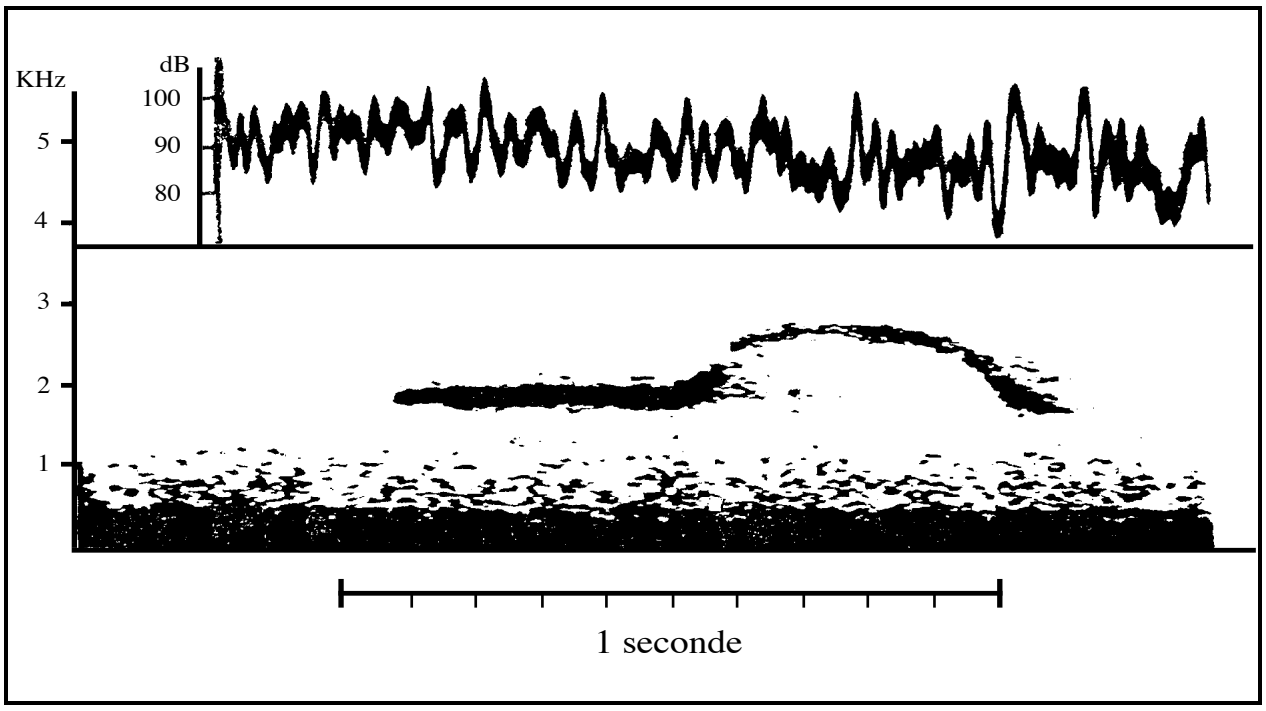


Fig. 76 : émergence d'une forme sur un fond

3.2.1. Bruits de faible niveau

Cette conception permet de comprendre la gêne provoquée par les bruits faibles. Une goutte d'eau qui tombe régulièrement d'un robinet, la nuit, dans un appartement calme, le papier de bonbon qu'un voisin de cinéma froisse avec application, sont des bruits qui peuvent être agaçants, voire insupportables dans le premier cas, et dont le niveau physique est cependant si faible qu'il est immensurable par le sonomètre. Leur forme est en revanche très originale par rapport à leur contexte d'émergence et leur perception en est facilitée d'autant.

Ce problème se pose d'ailleurs souvent dans les lieux calmes ou insonorisés : si le niveau sonore est effectivement réduit, l'originalité formelle des bruits n'est pas altérée pour autant, et une gêne, autrefois mal comprise par l'acoustique traditionnelle, peut subsister en présence de tels signaux, d'autant plus qu'un réflexe malencontreux conduit parfois à tendre l'oreille pour mieux les entendre.

3.2.2. Bruit et quantité d'information

L'information peut être définie en première analyse comme *ce qui change dans un signal*. Plus la forme du bruit est originale par rapport à son contexte d'émergence, plus elle véhicule d'information, et plus elle est ressentie comme nuisante. Un avertisseur d'automobile est bien perçu dans le brouhaha de la circulation, mais plus encore s'il émet plusieurs tons successifs (c'est d'ailleurs interdit par le code de la route). Bouasse l'avait déjà remarqué il y a plus d'un demi-siècle :

> « J'écris ces pages, fenêtre ouverte sur un jardin, à 60 mètres d'une avenue qui est route nationale. J'entends corner les autos. J'ai l'agrément supplémentaire des petites cornes utilisées par les receveuses des remorques des tramways… Je suis plus agacé par les petites cornes, non qu'elles soient sensiblement plus aiguës que les cornes d'auto, mais parce que ces dames jouent des airs ». [1]

[1] H. Bouasse, préface de *Tourbillons, Circulation, Forces acoustiques*, Paris, 1931.

Le bruit considéré comme une forme peut-il être mesuré ? Les récents développements de la théorie de l'information, particulièrement dans le traitement des images, ont montré que c'était parfaitement possible. Mesurer un bruit consiste donc à *extraire la quantité d'information d'une forme*, à évaluer son originalité par rapport à son environnement, et pas seulement à chiffrer ses dimensions physiques.

3.2.3. Signaux d'avertissement

Nous sommes en mesure, à la lumière de ces nouvelles conceptions, de définir ce que doivent être les caractéristiques d'un signal d'avertissement. C'est l'exact contraire du bruit, le signal utile par excellence. Sa forme est plus importante que son intensité, et sera choisie après analyse du fond sonore sur lequel le signal doit émerger. C'est ainsi par exemple qu'une sonnerie métallique serait très mal adaptée à l'ambiance h de la figure 75 : il faudrait plutôt là un son à évolution « oblique », comme une sirène ascendante et descendante. Dans un bruit de fond erratique (i), une forme régulière et surtout répétitive sera parfaitement entendue, même si son intensité est nettement inférieure à celle du fond sonore. La SNCF a effectué durant plusieurs années des analyses précises du bruit ambiant dans les gares pour déterminer la bande de fréquence la plus favorable à la diffusion par haut-parleurs de ses messages parlés. Le résultat en est une nette amélioration de l'intelligibilité des annonces.

4. Effets du bruit sur l'homme

Les effets pernicieux du bruit sont mieux connus depuis quelques années, et les spécialistes ne cessent d'en souligner les dangers et d'attirer l'attention des Pouvoirs publics.

4.1. Troubles de l'écoute

Le bruit provoque des effets de masque, brouillages et anamorphoses susceptibles d'altérer la signification du langage, avec ce que cela suppose d'irritation, d'énervement ou de baisse d'attention. Il peut perturber la localisation des sources sonores, recouvrir des ordres importants ou des signaux d'avertissement, risquant ainsi de provoquer des accidents.

4.2. Traumatismes auditifs

Le bruit est responsable de la fatigue auditive et surtout de la surdité professionnelle ; il accentue en outre la diplacousie (cf. chap XII § 2.5). Les lésions traumatiques dues à des explosions sont heureusement assez rares. On estime à 185 dB l'intensité requise pour rompre les tympans, ce niveau pouvant être largement dépassé lors d'attentats à la bombe. À titre comparatif, le niveau de crête d'un coup de fusil de chasse dépasse 160 dB à 30 cm.

Les bruits intenses portent également atteinte au sens de l'équilibre, par suite d'une trop forte stimulation vestibulaire[1]. Cela peut aller jusqu'à des vertiges accompagnés de nausées, de vomissements, provoquer des chutes et même des syncopes (comme cela est fréquemment observé lors des concerts de rock).

4.3. Effets physiologiques généraux

Le bruit n'agit pas seulement sur les organes de l'ouïe, mais sur l'ensemble du système nerveux, créant des désordres neurovégétatifs. Les observations systématiques ne sont pas faciles à effectuer, car il n'est évidemment pas question de soumettre un organisme humain à des expériences susceptibles de le léser. Certains effets ont pu néanmoins être mis en lumière : action nocive sur la digestion, troubles circulatoires et du métabolisme en général, avec bien sûr altération du sommeil entraînant une diminution de la récupération.

---

[1] K.D. Kryter, *The Effect of Noise on Man*, New York, 1970.

Cela se répercute sur le psychisme et agit sur le comportement, induisant une agressivité pouvant conduire jusqu'au geste meurtrier, comme le rappelle à longueur d'années la rubrique des faits divers dans les journaux.

Certaines vibrations très intenses, même inaudibles comme les infrasons, peuvent être nocives pour le corps humain lorsque la fréquence excitatrice est égale à la fréquence propre d'une de ses parties : 10 à 12 Hz pour la colonne vertébrale, 60 Hz pour la cage thoracique, 30 à 80 Hz pour les globes oculaires.

L'effet des ultrasons (> 20 000 Hz) sur l'organisme est encore mal connu, car ces ondes s'accompagnent presque toujours d'interférences de fréquences inférieures audibles, et il n'est pas aisé de distinguer l'action propre des unes et des autres. En conclusion, même si les effets du bruit dépendent du sujet, de son état général physique et psychique, les conséquences en sont toujours néfastes et pas forcément décelables dans l'immédiat.

4.4. Protections individuelles contre le bruit

Elles sont de plus en plus utilisées, sans doute à cause du prix élevé de l'insonorisation des habitations. Il existe trois sortes de protections sur le marché à l'heure actuelle :

a) les boules de cire
b) les bouchons d'oreille
c) les casques serre-tête

Leur efficacité est facile à mesurer, par égalisation de la sonie de deux sons de même fréquence entendus avec et sans protection.

a) Les boules de cire se pétrissent avec les doigts et s'ajustent dans le conduit auditif ; l'atténuation moyenne en est de 25 dB, meilleure dans les aigus (jusqu'à 35 dB) ; mais ces boules ne sont pas faciles à placer, et ne tiennent alors pas bien.

b) Les bouchons d'oreille se présentent sous la forme de petits cylindres ou de cônes, en matière plastique ou en caoutchouc, à introduire dans le conduit auditif : l'atténuation va de 0 dB (pour certaines marques) à plus de 35 dB[1] ; ils sont généralement conçus pour laisser passer les bandes de fréquence du langage. Mais leur port prolongé cause souvent des irritations, voire des infections dans le conduit auditif.

c) Les casques serre-tête ressemblent aux casques d'écoute dits « fermés » dont les coussins enveloppent largement les oreilles et contiennent des matériaux isolants ; leur atténuation est comparable à celle des dispositifs précédents, et donc aussi peu efficace contre le bruit de fond. Ils sont obligatoires à certains postes de travail dans les ateliers très bruyants. Malheureusement, s'ils tiennent bien, ils compriment les tempes, entravent la circulation sanguine et provoquent des maux de tête[2].

Les dispositifs individuels de protection présentent donc de nombreux inconvénients, et il est déconseillé de les utiliser comme un moyen permanent de défense contre le bruit.

* *
*

La législation est aujourd'hui importante en matière de bruit et débouche sur une réglementation de plus en plus précise (cf. chap. XII § 2.3.1). Elle reste cependant en retrait par rapport aux recommandations des experts acousticiens et médicaux, qui estiment dans l'ensemble que les normes devraient être redéfinies selon un barème de ce type :

entre 30 et 65 Ph : réactions physiologiques perceptibles
entre 65 et 80 Ph : perturbations psychiques et physiologiques
entre 80 et 95 Ph : traumatismes possibles
à partir de 95 Ph : traumatismes certains

[1] A. Darabont, *La lutte contre le bruit*, Paris, 1979.
[2] M.-C. Botte et R. Chocholle, *Le bruit*, Paris, [4]1984.

La limite acceptable du bruit est donc de 80 Ph et même de 80 dB, car pour de tels niveaux l'important est l'énergie acoustique effectivement enregistrée par l'oreille ; la limite à ne jamais dépasser est inférieure à 100 dB, là où le risque se transforme en certitude.

Les seuils de tolérance au bruit sont de toute façon très difficiles à évaluer car l'aspect quantitatif ne résume pas à lui seul tout le contenu de la nuisance, les sons faibles pouvant, nous l'avons vu, être cause de désordres psychologiques.

CONCLUSION

La démarche adoptée dans ce cours peut finalement se résumer en deux points ; décrire les phénomènes physiques produisant une sensation sonore ; étudier cette sensation pour elle-même, selon ses lois propres, qui s'écartent de celles de l'acoustique théorique.

Cette distinction, fondement de la psychoacoustique, est indispensable à effectuer, de par la nature de nos facultés perceptives. Confronté aux paramètres physiques du son — fréquence, intensité et durée —, notre système auditif adopte un comportement spécifique conditionnant notre attitude face à la musique, et dont les principes essentiels peuvent être maintenant résumés en manière de conclusion.

1. Le système auditif ne sait pas mesurer les dimensions d'un signal acoustique : il ne compte pas les périodes des oscillations, n'entend pas la hauteur en hertz ni ne mesure l'intensité en décibels et le temps en secondes.

2. Le système auditif ne sait pas analyser un son en termes de formants, de nombre, répartition, intensité des composants, etc. En bref, il n'entend pas un spectre de 294 Hz à 23 harmoniques d'amplitude 1/n, valant 75 dB et durant 850 ms, mais un *ré* de violon *forte* durant un court instant. Tous les paramètres physiques du signal sont bien perçus, mais globalement, synthétiquement, pour constituer une **image acoustique.**

3. S'il n'effectue pas de mesure, le système auditif évalue en revanche les rapports quantitatifs avec précision. Son seuil de perception différentielle est d'environ 2 dB pour les intensités moyennes, et de 4 cents ou 1 σ pour les intervalles mélodiques ; la précision devient immense (inférieure au cent) avec les intervalles harmoniques, grâce à la perception des battements, en tout cas bien supérieure à celle des instruments de mesure. Pour les durées, nous sommes surtout sensibles aux fluctuations rythmiques.

4. D'une façon générale, le système auditif perçoit bien ce qui varie dans un son, c'est-à-dire la quantité d'information débitée. Mais cette notion s'avère complexe, car le taux d'information dépend directement de sa prévisibilité : si les changements opérés dans le signal sont toujours les mêmes, donc totalement prévisibles, ils ne seront plus perçus comme informations au bout d'un certain temps ; si, au contraire, ils prennent un caractère aléatoire et totalement imprévisible, le taux d'information débité demeure certes maximum, mais l'information perçue est cette fois encore quasi nulle, car le récepteur n'est plus adapté au décodage du message. C'est le cas d'un individu, par exemple, qui dirait des choses très intéressantes dans une langue que son interlocuteur ne comprend pas.

Il en va de même en musique où les algorithmes de la « compréhension » du message sont les règles de composition, au sens large du terme, quel que soit le type de langage.

5. Le système auditif ne fait pas d'intégration ou de moyenne au sens mathématique du terme, il n'arrondit pas, ne « lisse » pas les courbes mais au contraire conserve aux phénomènes toute leur complexité ; ses réponses dépendent de tellement de facteurs d'ordre psychosomatique qu'il n'est jamais certain de réagir de la même façon aux mêmes stimulus.

6. Le système auditif est incapable de faire des équivalences, parce qu'il considère le son comme une forme. De même que l'œil ne reconnaît pas comme identiques un carré et un triangle de surfaces pourtant égales, la main deux objets différents mais de même poids, l'oreille n'éprouve pas de sensations comparables entre deux spectres de fréquences et de niveaux identiques si leur forme

acoustique est différente. C'est pourquoi expérimenter avec des sinusoïdes ne donne que peu de renseignements sur les sons réels.

7. Il n'existe pas de paupières pour les oreilles, c'est un fait, mais le cerveau dispose néanmoins du pouvoir de « déconnecter » les capteurs auditifs, de façon à ce que nous n'entendions effectivement plus les sons extérieurs. Cette fonction est mise en place pendant le sommeil, où les capteurs auditifs continuent de fonctionner normalement, mais également à l'état de veille, en cas de forte concentration ou d'attention focalisée ailleurs.

Surtout, le système auditif sait filtrer l'information. Il le fait d'ailleurs en permanence, car l'environnement sonore est trop riche pour être traité intégralement. C'est l'écoute sélective, qui permet d'isoler une voix dans un brouhaha de conversations, de suivre une ligne mélodique dans la polyphonie, d'identifier un timbre particulier dans un ensemble instrumental.

* *
*

Le système auditif est donc un dispositif à capter et à traiter des formes, véritables images mentales formées dans le cortex auditif. Il effectue des comparaisons entre les nouvelles venues et le contenu de sa mémoire, les trie, les classe, établit entre elles des taux de corrélation ; il opère des associations non seulement au niveau auditif, mais intégrant d'autres stimulations sensorielles, et dont le résultat final dépend d'innombrables facteurs parmi lesquels la culture et l'éducation, la mémoire, le potentiel intellectuel, la sensibilité et l'affectivité. Il peut aussi se tromper, confondre, oublier, et rendre ainsi unique l'expérience musicale individuelle de l'homme.

BIBLIOGRAPHIE

Les titres cités dans le cours du texte dont l'intérêt est purement historique ne sont pas repris ici. Les étudiants intéressés par cet aspect de l'acoustique musicale peuvent consulter les ouvrages de HUNT et de LINDSAY (cf. infra).

ASSELIN (P.-Y.), *Musique et tempérament : théorie et pratique de l'accord à l'ancienne*, Paris, 1984.

BACKUS (J.), *The Acoustical Foundations of Music*, New York, ^{2}1977.

BEKESY (G. v.), *Experiments in Hearing*, New York, 1960.

BENADE (A. H.), *Fundamentals of Musical Acoustics*, Londres, 1977.

BONFILS (P.), RÉMOND (M.-C.) et PUJOL (R.), « Efferent tracts and cochlear frequency selectivity », *Hearing Research*, 24 (1986).

BOTTE (M.-C.) et CHOCHOLLE (R.), *Le bruit*, Paris, ^{4}1984.

CANAC (F.), *L'acoustique des théâtres antiques. Ses enseignements*, Paris, 1967.

CANAC (F.) éd., *Acoustique musicale*, Colloque du CNRS, Paris, 1959.

CHAILLEY (J.), *Formation et transformation du langage musical, I, Intervalles et échelles*, Paris, 1964.

CHANGEUX (J.-P.), *L'homme neuronal*, Paris, 1983.

CHARDIN (D.), *Les surdités*, Paris, 1982.

CONDAMINES (R.), *Stéréophonie. Cours de relief sonore*, Paris, 1978.

CORDIER (S.), *Piano bien tempéré et justesse orchestrale : le tempérament égal à quintes justes*, Paris, 1982.

CRITCHLEY (M.) et HENSON (R. A.), *Music and the Brain*, Springfield, 1977.

DARABONT (A.), *La lutte contre le bruit*, Paris, 1979.

ÉMERY (É.), *La gamme et le langage musical*, Paris, 1961.

FELDTKELLER (R.) et ZWICKER (E.), *L'oreille, récepteur d'information*, trad. fr. Paris, 1982.

FLETCHER (H.), *Speech and Hearing in Communication*, New York, 1953.

FRANCÈS (R.), *La perception de la musique*, Paris, ^{2}1972.

GRÉMION, (J.), *La planète des sourds*, Paris, 1991.

GRIBENSKI (A.), *L'audition*, Paris, ^{4}1975.

HARRIS (C. M.), *Handbook of Noise Control*, New York, ^{2}1979.

HUNT (F. V.), *Origins in Acoustics : The Science of Sound from Antiquity to the Age of Newton*, New Haven, 1970.

KELLETAT (H.), *Zur musikalischen Temperatur, insbesondere bei J.-S. Bach*, Kassel, 1960.

KNUDSEN (V. O.) et HARRIS (C. M.), *Le projet en acoustique architecturale*, trad. fr. Paris, 1957.

KRYTER (K. D.), *The Effects of Noise on Man*, New York, 1970.

LEGROS (H.), « Le problème du tempérament », *Bulletin du GAM,* 61 (1972).

LEHMANN (R.), *L'acoustique des bâtiments*, Paris, ^{2}1968.

LEHMANN (R.), *Éléments de Physio et de Psychoacoustique*, Paris, 1969.

LEIPP (É.), *Acoustique et musique*, Paris, ^{4}1984.

LEIPP (É.), « Métrologie et audition », *Bulletin du Groupement des Acousticiens de Langue Française* (1974).

LEIPP (É.), « Le problème de la perception des signaux acoustiques par effet de contraste », *Annales des Télécommunications*, XX/5-6 (1965).

LEIPP (É.), « Tour d'horizon sur le diapason », *Bulletin du GAM*, 37 (1970).

LIÉNARD (P.), *Décibels et indices de bruits*, 1978.

LINDSAY (R. B.), *Acoustics : Historical and Philosophical Development*, Stroudsburg, 1972.

LÉOTHAUD (G.), « Acoustique musicale et psychophysiologie de la perception », *Précis de musicologie*, nouv. éd. Paris, 1984.

LÉOTHAUD (G.), « Vers une psychophysiologie de la réaction auditive : modélisation de la perception », *L'École maternelle française*, 6 (1975).

MATRAS (J.-J.), *Le son*, Paris, ^{5}1972.

MERCIER (D.) éd., *Le livre des techniques du son*, t. 1, Paris, 1987.

MERCIER (J.), *Traité d'acoustique*, 3 vol., Paris, 1962.

MÉRY (J.), « Presbyacousie et socioacousie », *Revue d'acoustique*, 37 (1976).

MOLES (A.), *Physique et technique du bruit*, Paris, 1952.

MOLES (A.), *Théorie de l'information et perception esthétique*, Paris, ^{2}1972.

PIERCE (J.), *Le son musical*, trad. fr. Paris, 1984.

RISSET (J.-C.), «Hauteur et timbre des sons», *Conférences des Journées d'études du Fest. intern. du Son*, Paris, 1976.

RISSET (J.-C.), « Paradoxes de hauteur », Rapports IRCAM (1978).

ROCARD (Y.), *Dynamique générale des vibrations*, Paris, 1971.

RUSSOLO (L.), *Arte dei rumori*, Milan, 1913.

SAUNDERS (F.), « Physique et musique », *Sons et musique*, trad. fr. Paris, 1980.

SCHAFER (R. Murray), *Le paysage sonore*, trad. fr. Paris, 1979.

SCHROEDER (M. R.), « Computer Models for Concert Hall Acoustics », *American Journal of Physics*, 41/4 (1973).

SEASHORE (C. E.), « Forms of artistic pitch deviations in singing », *Psychological Bulletin*, 677 (1934).

SEASHORE (C. E.), *The Psychology of Music*, réed. New York, 1967.

STAUDER (W.), *Einführung in die Akustik*, Wilhelmshaven, 1976.

STEVENS (S. S.), *Le son et l'audition*, trad. fr. Paris, 1966.

STEVENS (S. S.) et WARSHOFSKY (F.), *L'acoustique*, trad. fr. Paris, 1970.

STEVENS (S. S.) et DAVIS (H.), *Hearing, its Psychology and Physiology*, New York, ^{3}1948.

TAYLOR (R.), *Le bruit et ses méfaits*, trad. fr. Paris, 1973.

TOBIAS (J. V.) éd., *Foundations of Modern Auditory Theory*, 2 vol., New York, 1970.

VAN ESBROEK (G.) et MONTFORT (G.), *Qu'est-ce que jouer juste ?* Bruxelles, 1946.

WEVER (E. G.), *Theory of Hearing*, New York, 1953.

WINCKEL (F.), « Architecture et musique spatiale », *Conférences des Journées d'études du Fest. intern. du Son*, Paris, 1971.

WINCKEL (F.), *Music, Sound and Sensation : a modern Exposition*, New York, 1967.

WINCKEL (F.), *Vues nouvelles sur le monde des sons*, trad. fr. Paris, 1960.

WOOD (A.), *The Physics of Music*, New York, ^{7}1975.

TABLE DES FIGURES

Fig. 48 : le système auditif 75
Fig. 49 : l'oreille moyenne 75
Fig. 50 : l'oreille interne 76
Fig. 51 : le limaçon 77
Fig. 52 : la cochlée 78
Fig. 53 : l'organe de Corti 78
Fig. 54 : modélisation de la cochlée 84
Fig. 55 : la tonotopie cochléaire 84
Fig. 56 : théorie de la volée 86
Fig. 57 : progression logarithmique 92
Fig. 58 : le champ auditif humain 99
Fig. 59 : le diagramme de Fletcher 100
Fig. 60 : l'audiogramme tonal 104
Fig. 61 : surdité de perception 107
Fig. 62 : audiogramme en valeurs de seuils 108
Fig. 63 : la presbyacousie 109
Fig. 64 : la sensation de hauteur 116
Fig. 65 : le diagramme de Stevens 118
Fig. 66 : le système pythagoricien 129
Fig. 67 : le tempérament zarlinien 131
Fig. 68 : le système mésotonique classique 133
Fig. 69 : le tempérament Kirnberger II 135
Fig. 70 : fréquences du tempérament égal 138
Fig. 71 : timbre et composition spectrale 151
Fig. 72 : transitoires d'attaque : proportion de bruit 153
Fig. 73 : transitoires d'attaque : durée 154
Fig. 74 : transitoires d'attaque : évolution des composants 155
Fig. 75 : différents bruits de fond 161
Fig. 76 : émergence d'une forme sur un fond 162